



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA ODLITKŮ Z ELEKTROVODNÉ MĚDI

MANUFACTURE OF CASTINGS FROM ELECTRICAL COPPER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Janský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Vojtěch Janský**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Slévárenská technologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Výroba odlitků z elektrovodné mědi

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Čisté kovy mají zpravidla velmi nízké mechanické vlastnosti a jsou často používány pouze pro speciální účely. Čisté kovy nemají také často vhodné slévárenské vlastnosti. Odlitky z čisté mědi jsou v technické praxi využívány pro elektrovodné účely. Výroba odlitků pro toto použití je problematická s ohledem na dosažení požadovaných hodnot elektrické vodivosti, protože ty jsou silně ovlivňovány i strukturou odlitku a výskytem výrobních defektů ve struktuře odlitku. Měď patří mezi prvky s nízkou afinitou ke kyslíku, což má za následek poměrně vysokou rozpustnost kyslíku a také vodíku. Oba tyto prvky mají silně negativní vliv na vlastnosti odlitků z elektrovodné mědi.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je ověření vlivu podmínek metalurgického zpracování, použité slévárenské technologie a podmínek tuhnutí na mechanické vlastnosti a elektrickou vodivost odlitků z čisté mědi. Na základě experimentu stanovit vliv vakuového zpracování mědi na vnitřní jakost a vlastnosti experimentálního odlitku z elektrovodné mědi.

Seznam doporučené literatury:

ROUČKA, J. Metalurgie neželezných kovů. Brno: CERM, 2005.

CAMPBELL, J. Casting, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000, ISBN 0-7506-1696-2.

TURKDOGAN, E.T. Fundamentals of steelmaking. London: The Institute of materials, 1996. ISBN 1-86125-004-5.

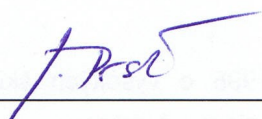
GRÍGEROVÁ, T., I. LUKÁČ a R. KOŘENÝ. Zlievarenstvo neželezných kovov. Bratislava: Edícia hutníckej literatúry (Alfa), 1988.

KUCHAŘ, L. Hutnictví neželezných kovů. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1987, 335 s.

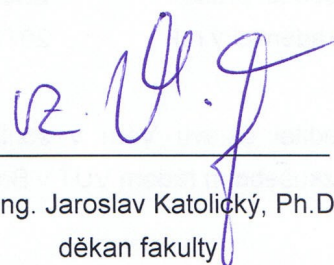
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 3. 10. 2017





prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je ověření vlivu podmínek metalurgického zpracování, použité slévárenské technologie a podmínek tuhnutí na elektrickou vodivost odlitků z čisté mědi. Experiment sleduje rozdíly mezi tavením za normálního tlaku a ve vakuu a mezi odlitkem opatřeným chladítkem, izolací a přirozeným prostředím formy.

Klíčová slova

čistá měď, elektrická vodivost, znečištění mědi, metalurgické zpracování

ABSTRACT

The goal of this thesis is to verify influence of conditions of metallurgical treatment, used foundry technology and conditions of solidification on electrical conductivity of pure copper castings. The experiment part observe differences between alloy melting under normal pressure and in a vacuum and between casting provided with chill, insulation and natural environment of mould.

Key words

pure copper, electrical conductivity, impurity of copper, metallurgical processing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JANSKÝ, V. *Výroba odlitků z elektrovodné mědi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 79 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Výroba odlitků z elektrovodné mědi vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum: 25.5.2018

Bc. Vojtěch Janský

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Antonínu Záděrovi, Ph.D. za konzultace a pomoc při vypracování této práce a také Ing. Václavu Kaňovi, Ph.D, Ing Vítězslavu Pernicovi, Ph.D. a Ing. Martinu Myškovi za pomoc a rady při vypracování praktické části této práce.

OBSAH

| | |
|--|----|
| ABSTRAKT | 3 |
| PROHLÁŠENÍ | 4 |
| PODĚKOVÁNÍ | 5 |
| OBSAH | 6 |
| ÚVOD | 8 |
| 1 TECHNOLOGICKÉ VLASTNOSTI MĚDI | 9 |
| 2 ELEKTRICKÁ VODIVOST | 12 |
| 2.1 KLASICKÁ ELEKTRONOVÁ TEORIE KOVŮ | 12 |
| 2.2 KVANTOVÁ TEORIE KOVŮ | 13 |
| 2.3 PÁSOVÁ TEORIE KOVŮ | 16 |
| 2.4 TEORIE BRILLOUINOVÝCH ZÓN | 18 |
| 3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ELEKTRONOVOU VODIVOST V KOVECH | 20 |
| 3.1 PORUCHY V MATERIÁLU | 20 |
| 3.2 VLIV PŘÍMĚSÍ NA ELEKTRICKOU VODIVOST MĚDI | 23 |
| 3.2.1 PRVKY NEROZPUSTNÉ V MĚDI | 24 |
| 3.2.2 PRVKY ROZPUSTNÉ V MĚDI MÉNĚ OVLIVŇUJÍCÍ ELEKTRICKOU VODIVOST | 25 |
| 3.2.3 PRVKY ROZPUSTNÉ V MĚDI SILNĚ OVLIVŇUJÍCÍ ELEKTRICKOU VODIVOST | 28 |
| 3.2.4 NEKOVOVÉ PRVKY NEVÝZNAMNĚ OVLIVŇUJÍCÍ ELEKTRICKOU VODIVOST | 32 |
| 4 POSTUPY PŘI TAVENÍ ČISTÉ MĚDI | 37 |
| 4.1 REDUKČNÍ ZPŮSOB TAVENÍ | 37 |
| 4.2 OXIDICKÉ TAVENÍ | 38 |
| 4.2.1 BĚŽNÁ DEZOXIDACE | 39 |
| 4.2.2 EFEKTIVITA DEZOXIDAČNÍCH PROSTŘEDKŮ | 40 |
| 4.2.3 STUPŇOVITÁ DEZOXIDACE | 41 |
| 4.2.4 VÁZÁNÍ ZBYTKOVÉHO DEZOXIDOVADLA | 41 |
| 4.2.5 OVĚŘENÍ ŘÁDNÉ DEZOXIDACE | 42 |

| | | |
|-------|-----------------------------------|----|
| 5 | PŘÍPRAVA PROVEDENÍ EXPERIMENTU | 44 |
| 5.1 | VÝROBA FOREM | 44 |
| 5.2. | PRVNÍ TAVBA | 45 |
| 5.3. | DRUHÁ TAVBA | 47 |
| 5.4 | TŘETÍ TAVBA | 49 |
| 6 | VYHODNOCENÍ | 51 |
| 6.1 | VYHODNOCENÍ VÝVINU PLYNŮ | 52 |
| 6.2 | VYHODNOCENÍ MIKROSTRUKTUR ODLITKŮ | 54 |
| 6.2.1 | PŘÍPRAVA METALOGRAFIE | 54 |
| 6.2.2 | MIKROSTRUKTURY VZORKŮ | 56 |
| 6.3 | VYHODNOCENÍ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI | 59 |
| 6.3.1 | METODY MĚŘENÍ A JEJICH VÝSLEDKY | 59 |
| 6.3.2 | STATISTICKÉ ZHODNOCENÍ | 69 |
| | ZÁVĚR | 74 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 75 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK | 78 |
| | SEZNAM PŘÍLOH | 79 |

ÚVOD

Měď (lat. Cuprum) je po zlatu druhým nejstarším známým prvkem v historii lidstva. Zmínky o ní se objevují v mnoha historických pramenech, například v bibli či Homérových spisech. Archeologické nálezy měděných výrobků odhalují, že měď byla používána již 6000 až 7000 let před Kristem. [2]

Měď je používána nejčastěji jako slitina mědi a cínu (bronzy), mědi a zinku (mosazi) nebo mědi a niklu (monel). Změnou chemického složení je dosahováno rozličných mechanických, technologických a užitých vlastností. Důležitou vlastností slitin mědi je zejména jejich korozní odolnost i v korozně silně agresivních prostředích. Slitiny mědi mají obvykle dobré slévárenské vlastnosti a jsou i dobře tvařitelné a obrobitelné.

Specifickou oblastí použití je použití mědi jako elektrovedného materiálu. Elektrická vodivost mědi je po stříbru druhá nejvyšší z technicky používaných materiálů. Pro elektrovedné účely je používána měď s minimálním podílem příměsí, neboť řada prvků i v minimálních koncentracích elektrickou vodivost mědi silně snižuje.

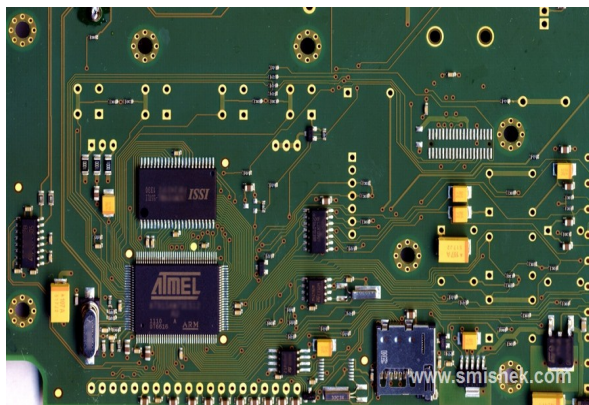
Odlitky z elektrovedné jsou možnou náhradou dražších tvářených výrobků. Tvářená elektrovedná měď má jemnozrnnou strukturu s minimálním výskytem pórů a dosahuje maximálních hodnot elektrické vodivosti. Při výrobě odlitků z elektrovedné mědi je nutné řešit problémy spojené s rozpouštěním plynů v tavenině (bubliny) a objemovými změnami při tuhnutí (staženiny). Výrobou odlitků z elektrovedné mědi se zabývá pouze velmi málo výrobců a zvládnutí této technologie dává příležitost slévárnám pro zvýšení objemu výroby odlitků v zajímavém a lukrativním technickém oboru.

Téma diplomové práce vychází z požadavku slévárny neželezných kovů v Novém Ransku na vývoj technologie výroby odlitků z elektrovedné mědi. Uvedená slévárna podpořila řešení této práce poskytnutím materiálu a finančním zajištěním experimentu a jeho vyhodnocení.

1 TECHNOLOGICKÉ VLASTNOSTI MĚDI

Nejvíce ceněnými vlastnostmi mědi jsou její elektrická a tepelná vodivost, dále pak také odolnost vůči korozi a dobrá svařitelnost. Tyto vlastnosti jsou využívány v energetice pro výrobu vodivých součástí – obr.1, tepelných chladičů – obr.2, součástek vystavovaných koroznímu prostředí a také například pro sváření topenářských potrubí.

Elektrická vodivost je pro měď tak charakteristická vlastnost, že v roce 1913 byla zvolena za tzv. mezinárodní standart IACS (International Annealing Copper Standart), kdy vodivost vyžíhaného vzorku mědi s vodivostí 58 Siemensů na metr ($S \cdot m^{-1}$) je 100% IACS. Tabulka 1.1 zobrazuje několik známých kovů a jejich elektrickou a tepelnou vodivost. [1,2]



Obr. 1 Třísťný spoj [3]

Tabulka 1.1 Relativní hodnoty elektrické a tepelné vodivosti některých kovů [2]

| Kov | Elektrická vodivost IACS | Tepelná vodivost (Cu = 100%) |
|--------------|--------------------------|------------------------------|
| Stříbro (Ag) | 106 | 108 |
| Měď (Cu) | 100 | 100 |
| Zlato (Au) | 72 | 76 |
| Hliník (Al) | 62 | 56 |
| Hořčík (Mg) | 39 | 41 |
| Železo (Fe) | 13 | 13 |

Tepelná vodivost je další velmi oceňovanou vlastností mědi, která ji předurčuje pro použití v chladících soustavách, tepelných výměnících či například na pivovarské varny. Z tab.1.1 lze vyčíst, že nejlépe ze všech kovů vede jak elektrinu, tak teplo stříbro, následované mědí a zlatem. Přijatelné hodnoty nabývá také hliník a malou elektrickou i tepelnou vodivost má hořčík a železo. Z tabulky 1.1



Obr. 2 Měděný chladič [4]

je také patrná závislost mezi elektrickou a tepelnou vodivostí. Vztah (1.1) tuto souvislost určuje díky zákonu Wiedermann-Franz-Lorenz

$$\frac{\lambda_t}{\gamma} = L \cdot T \quad (1.1)$$

kde

λ_t je měrná tepelná vodivost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

γ je měrná elektrická vodivost [$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$]

L je Lorencovo číslo [$\text{W} \cdot \Omega \cdot \text{K}^{-2}$] (2,2 až $3,0 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \Omega \cdot \text{K}^{-2}$) [1,2,5]

Odolnost proti korozi je silně podmíněná prostředím, ve kterém se měď nachází. Pro podmínky běžného prostředí je měď velmi vhodným materiálem. Na vzduchu se pokrývá tenkou vrstvou měděných oxidů, která brání dalšímu postupu koroze. Velmi častým jevem je také výskyt tzv. měděnky, neboli uhličitanu měďnatého, který je k vidění na téměř každém měděném objektu na veřejných prostranstvích – obr.3. [2]



Obr. 3 Socha pokrytá měděnkou [6]



Obr. 4 Svařená měděná pípa [7]

Velmi špatně naproti tomu odolává prostředí některých kyselin, především kyseliny dusičné, sírové, selenové a disírové a také za přítomnosti alkalických kyanidů. [2]

Měď a její slitiny – tzn. různé druhy bronzů (cínové, hliníkové), mosazi (slitiny Cu-Zn) a monely (slitiny Cu-Ni) - kromě mosazí jsou také velmi dobře svařitelné, především plamenem a metodou TIG - obr.4. Mosazi není možné svařovat ve vakuu, jelikož vysoký tlak par zinku způsobí odpařování a rozstříkávání taveniny. U čisté mědi je předpokladem pro kvalitní svár velmi čistý materiál s obsahem jednotlivých nečistot pod 5 ppm. [1,2,8]

Velmi speciální vlastností mědi jsou její antibakteriální účinky. Již Hippokrates 400 let před n. l. pozoroval urychlení hojení ran při přikládání mědi, aniž by došlo ke hnisání. Dle moderních výzkumů je v prostředí obsahujícím měď zničeno do dvou hodin až 99,9% bakterií. Tato zjištění vedou k testování použitelnosti mědi pro vybavení nemocnic typu klik u dveří – obr.5 a madel – obr.6, která by takto mohla zůstat sterilní. [2]



Obr. 5 Měděná hygienická klika [9]



Obr. 6 Mědí vybavené nemocniční lůžko [10]

Použití čisté mědi v elektronice a elektrotechnice

Měď se díky své elektrické i tepelné vodivosti využívá v mnoha odvětvích. Odhaduje se, že až 70% spotřeby mědi je užito právě kvůli těmto vlastnostem. Velkými spotřebiteli měděných elektrických vodičů jsou především sítě vysokého, nízkého a malého napětí. V případě rozvodů nízkého napětí v budovách je v dnešní době měď preferována před hliníkem, u kterého je problém s pevností, kdy při dotažení spoje se postupně deformuje a tak může docházet ke ztrátě kontaktu a následným zkratům. Například v roce 1974 tvořili hliníkové rozvody 31% všech rozvodů, zatímco v roce 1991 pouze 8%. Dále je velká spotřeba v odvětví elektrických motorů, kde jsou veškerá vinutí měděná (obr. 7). [1,2]

Důležitými součástkami z mědi jsou elektrické kontakty. Tyto spoje v elektrických okruzích jsou preferovány v měděné formě z několika důvodů. Prvním je samozřejmě vysoká elektrická vodivost, díky které se spoje méně zahřívají. Dalším je dobrá tepelná vodivost, díky které je vznikající teplo rychle odváděno či rozprostřeno na celou součástku. Problémem u těchto součástek je jejich pokrývání vrstvou oxidů, jejichž vznik je podporován při spínání kontaktu. [1]

Dalším, především v současné době velmi důležitým odvětvím použití jsou tištěné obvody (obr.1). Folie použité při jejich výrobě mohou být vyráběny válcováním za tepla nebo elektrolyticky, kdy vznikají sloupcová zrna kolmá na plochu folie. Výsledný rozdíl spočívá především v mechanických vlastnostech. Folie válcované mají menší pevnost, avšak větší tažnost a kujnost, zatímco folie vzniklé elektrolyticky jsou pevnější a méně tažné a kujné. [1]



Obr. 7 Měděné vinutí elektrického motoru [11]



Obr. 8 Měděné konektory [12]

Neopomenutelnými jsou v dnešní době také velká množství různých konektorů (obr. 8). Pro tyto účely se však častěji užívají různé typy méně legovaných bronzů, jelikož samotná čistá měď má pro tyto účely příliš nízkou pevnost a tvrdost. [1]

2 ELEKTRICKÁ VODIVOST

Elektrická vodivost (jednotka Siemens [S]) je uváděna formou *měrné* elektrické vodivosti, což je Siemens na metr, tj. zkratkou $S \cdot m^{-1}$. Je to elektrický náboj, který při jednotkovém spádu el. potenciálu projde plochou za daný čas. Jiná definice dává měrnou elektrickou vodivost, neboli konduktivitu jako obrácenou hodnotu měrného odporu neboli rezistivity. Ta je definována jako odpor vodiče R v závislosti na průřezu S a délce vodiče l . [13]

$$\rho = R \cdot \frac{S}{l} \quad (2.1)$$

Zásadní vliv na velikost této veličiny má chování volných elektronů v kovu, které bylo popsáno několika různými teoriemi.

2.1 KLASICKÁ ELEKTRONOVÁ TEORIE KOVŮ

Nejstarší ze všech teorií byla zveřejněna roku 1900 pány P. Drudem a L. Lorentzem. Dle ní se volné elektrony uvnitř kovu chovají jako částice plynu uzavřené v nádobě a přechází mezi jednotlivými atomy, nejedná se tedy o neutrální mřížku, nýbrž o mřížku tvořenou kladnými ionty a mezi nimi se pohybujícími zápornými elektrony. Tato skutečnost se projevuje při elektrolýze, kdy kladné ionty přechází do elektrolytické lázně, přičemž dochází k rozpouštění anody. Naproti tomu i existence záporných elektronů je prokazatelná. Jedná se o fotoelektrický jev, kdy jsou elektrony emitovány na povrchu, takže opouští kov, nebo uvnitř kovu, kde se z nich stávají volné vodivostní elektrony. Tyto principy se hojně využívají u fotodiod nebo fototranzistorů. [13,14,34]

Vzhledem k tomu, že byla uveřejněna téměř dvacet let před rozvojem kvantové teorie pole, uvažuje tato teorie elektrony pouze jako hmotné částice, které jsou svým chováním podobné částicím plynu. Pracuje tedy se zákony kinetické teorie plynů. V praxi to znamená, že elektrony konají chaotický tepelný pohyb. Při pohybu elektron naráží do iontu, který spoluvytváří atomovou mřížku. Elektron průměrně urazí vzdálenost odpovídající vzdálenosti dvou atomů v mřížce - střední volnou dráhu elektronu (10^{-10} m). Jelikož se jedná o pohyb chaotický, není žádný ze směrů pohybu upřednostněn a navenek se nejeví žádné pochody formou elektrického proudu. Jestliže je ale kov vystaven elektrickému poli, které způsobí vznik potenciálového spádu, dostane pohyb řád. Elektrony letící ve směru pole jsou urychleny, ostatní jsou buďto zpomaleny v opačném pohybu nebo jsou zastaveny, případně urychleny ve směru proudu. Pohyb urychlených částic se pak projeví jako elektrický proud. [14,34]

Rychlost pohybu elektronů je přímo závislá na intenzitě elektrického pole a jejich průměrně uražená vzdálenost na tepelných kmitcích a pravidelnosti mřížky. To proto, že pohybující se elektron má při větším kmitání větší pravděpodobnost srážky s kladným iontem, čímž ztrácí svou energii, kterou předává iontu, čímž dojde k intenzivnějšímu kmitání. Tento jev je velmi známý a snadno pozorovatelný jako vzrůst teploty vodiče a také pokles jeho vodivosti. Nejlepší vodivost, jak z předchozích vět vyplývá, je při absolutní nule, kdy veškeré kmity ustávají a mnoho elektronů se s ionty nesrazí. Při nárůstu teploty pak dochází k přímo úměrnému nárůstu měrného elektrického odporu podle vztahu

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha_{el} \cdot t) \quad (2.1)$$

kde

ρ_0 je měrný odpor při absolutní nule [$\Omega \cdot m$] (pro měď $0,018 \mu\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$)

t je teplota [$^{\circ}C$]

α_{el} je teplotní součinitel elektrického odporu [K^{-1}] (pro měď $3,92 \cdot 10^{-3} K^{-1}$) [13]

2.2 KVANTOVÁ TEORIE KOVŮ

Přestože klasická teorie přinesla vysvětlení některých jevů probíhajících v kovech, nebylo možné jejím prostřednictvím vysvětlit jiné úkazy související s elektrickou vodivostí. Například proč mají různé kovy odlišnou vodivost a elektrony ve valenční vrstvě nepřispívají k měrnému teplu kovu. [14,34]

S formulováním kvantové teorie bylo zjištěno, že elektron, který je vázán k atomu, nemůže mít libovolnou energii (jako osamocený elektron ve vakuu), nýbrž jsou vymezeny jen určité energetické hladiny, ve kterých nabývá přesné množství energie -tzv. kvantum energie. [14,34]

Každý elektron se, vzhledem k opačnému náboji, snaží dostat co nejblíže k protonu v jádru, což znamená dosáhnout co nejnižší hladiny energie, které však zaujme pouze při absolutní nule (0 K). Vzhledem k zápornému náboji se elektronu přisuzuje i záporná energie, která se se zvětšující vzdáleností od jádra blíží k nule (elektronu dodáváme kladnou energii). [14,34]

Dodávání energie je dáno právě kvantovou povahou systému. Pro každou změnu hladiny je nutné dodat dostatečné množství energie naráz, nikoliv postupně. Naopak při přechodu z vyšší hladiny blíže k jádru elektron vydá přesné *kvantum* energie, které se jeví jako záření. Vztah mezi zářením a kvantem energie je dán Einsteinovou rovnicí:

$$h \cdot f = E_1 - E_2 \quad (2.2)$$

kde

h je Planckova konstanta [J.s] ($6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s)

f je kmitočet záření [Hz]

E_1, E_2 jsou dva energetické stavy [J]

a rovnicí de Broglieho:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v_e} \quad (2.3)$$

kde

λ je vlnová délka [m]

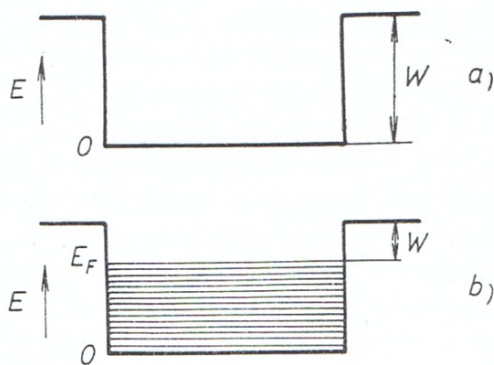
v_e je rychlost elektronu [m.s⁻¹]

m je hmotnost elektronu [kg] ($9,109 \cdot 10^{-31}$ kg)

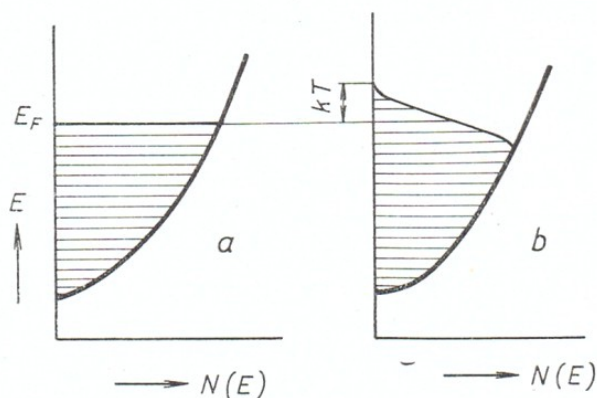
čímž se dostaneme ke spojení $\lambda = \frac{h}{m \cdot v_e} = \frac{v_e}{f} \quad (2.4)$

kdy můžeme určit, jakou vlnovou délku bude záření mít. [14]

Jasný rozdíl mezi klasickou a kvantovou teorií dává představa chování elektronů při absolutní nule. V klasické představě zaujme každý elektron nulovou pozici, což odpovídá stavu nulové energie v soustavě., jak je naznačeno na obr 9.



Obr. 9 Model kovu
a – dle klasické teorie
b – dle kvantové teorie [14]



Obr. 10 Vliv teploty na rozdělení energie elektronů
v kovu (a - $T=0$ K, b - $T > 0$ K) [14]

V kvantové teorii, kde zaujímají elektrony energetické dráhy však všechny mít nulovou energii nemohou, jelikož se nevejdou do jedné hladiny (orbitalu) dle Pauliho principu (viz obr. 15), zaujímají proto co nejnižší energetické stavy, kde nejvyšší z těchto stavů má tzv. Fermiho energii E_F . (obr. 9). Tato veličina je velmi podstatnou entitou, která není závislá na množství materiálu. Dle rovnice pro kinetickou energii $E_k = 1/2 \cdot m \cdot v^2$ lze vyjádřit Fermiho rychlost v_F .

Rovnice

$$k \cdot T_F = E_F \quad (2.5)$$

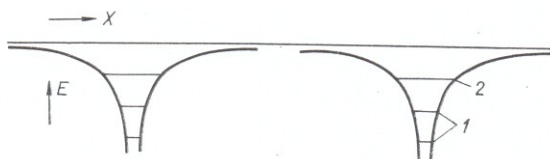
kde k je Boltzmannova konstanta [$J \cdot K^{-1}$] ($1,38 \cdot 10^{-23}$)

nám dává Fermiho teplotu T_F . Pro měď jsou tyto veličiny $E_F = 7,04$ eV, $T_F = 82\,000$ K a $v_F = 1,58 \times 10^6$ m/s. Tato teplota dává teplotu částice plynu, která by měla stejnou energii jako elektron při 0 K. Dle obr.10 lze vysvětlit změny při nenulové teplotě. Z grafů je možno odečítat hodnotu $N(E)$, označovanou jako hustotu možných stavů energie, který dává počet hladin na jednotku energie. Je zřejmé, že mezi E a $N(E)$ panuje kvadratická závislost. Vodorovné čáry v grafu jsou mírou zaplnění každé energetické hladiny, z čehož vyplývá, že s rostoucí teplotou mohou být elektrony z vyšších vrstev vybuzeny nad Fermiho energii. Elektrony v hlubších hladinách nemohou tepelnou energii přijmout, jelikož hladiny nad nimi jsou obsazené. Na druhou stranu při 20°C je potřebná energie pro vybuzení relativně vysoká – asi 1/40 eV. Proto není vzbuzeno příliš částic, které by měly vliv na měrné teplo kovu. [14,34]

2.3 PÁSOVÁ TEORIE KOVŮ

I když kvantová teorie pokryla některé fenomény, které nebyla klasická teorie schopná vysvětlit, stále nebylo možné vysvětlit, proč mají různé kovy různou vodivost a některé látky, které by měly mít možnost vést proud (například uhlík ve formě diamantu) jej nevedou. [14]

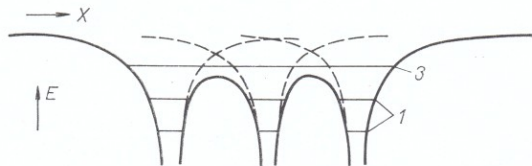
Předchozí dvě teorie neuvažovaly ve svém základu přítomnost elektrického pole uvnitř kovu, které vzniká působením elektricky nabitých iontů, resp. jej považovaly za konstantní. Ani jeden z těchto předpokladů není správný, jelikož náboj je vždy okolo uzlových bodů mřížky, není tedy konstantní, nýbrž periodický, čímž dochází také k periodickému rozložení potenciálu. [14]



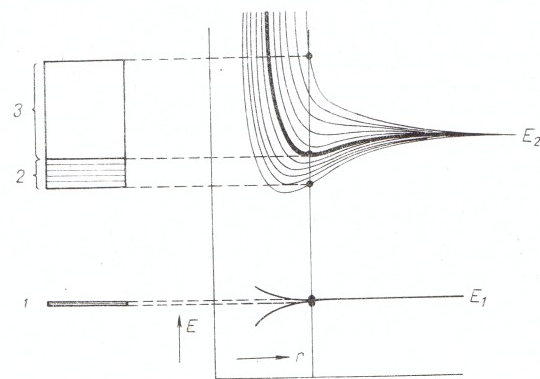
Obr. 11 Křivky vyjadřující závislost polohové energie elektronu E od polohy v prostoru v okolí kladného náboje [14]

Představu tohoto periodického rozložení můžeme demonstrovat pomocí chování elektronu a jádra. Na obr. 11 vidíme graf, který znázorňuje velikost energie elektronu v závislosti jeho polohy vůči jádru, které není zobrazeno, ale nachází se na „dně“ energetické jámy. Pokud se tedy elektron blíží, jeho energie se zvětšuje (v záporném smyslu) do nekonečna, naopak pokud se vzdaluje dále v ose x , jeho energie klesá blíže k nulové hodnotě. V pravé části obrázku je pak druhý kladný iont, který je však natolik vzdálen, že přímo na první iont nepůsobí. Pokud se elektron nachází přesně mezi nimi, nepůsobí na něj žádné síly, neboť od obou iontů jsou stejné a vzájemně se vyruší. [14,34]

Jiná (reálná) situace nastává, pokud jsou ionty k sobě blíže, a tak se vzájemně ovlivňují. Na obr. 12 takto tři ionty vzájemně narušují svá elektrická pole, resp. energie se sčítají. Původní potenciálové křivky jsou přerušované a součtové křivky jsou tučně vytažené a vzniká periodické rozložení pole. Elektrony, které jsou blízko k jádru jsou pevně vázané, ale ty, které jsou ve vyšších energetických hladinách, nemohou být přiřčeny k jedinému iontu, jelikož se nachází nad potenciálovou křivkou. Například valenční elektrony v hladině 2 na obr. 11 jsou pevně vázány k iontu, jelikož jsou pod potenciálovou křivkou, dojde-li však k přiblížení jiných iontů, dojde k poklesu potenciálu a elektrony se mohou stát volnými (hladina 3 na obr. 12). Na okraji materiálu je potenciálový skok vysoký, takže nemůže dojít k úniku elektronů z kovu, což znázorňují oba konce průběhu energie na obr. 12 [14,34]



Obr. 12 Křivky vyjadřující závislost energie elektronu v okolí dvou, resp. tří k sobě blízkých kladných nábojů (iontů, jader) [14]



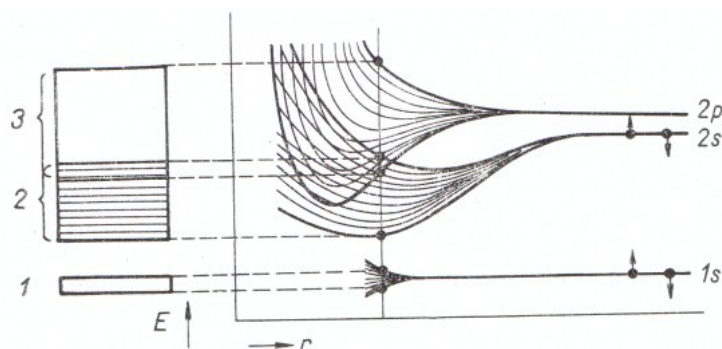
Obr. 13 Vznik energetických pásů v krystalu lithia [14]

Jelikož se jedná o pásovou teorii, je třeba si položit otázku „Co je to pás?“. Ten definujeme pomocí příkladu na atomu lithia, ke kterému se přibližují další atomy tohoto prvku. Na obr. 13 je vidět, že se zmenšující se vzdáleností mezi atomy r se vytváří skupina energetických hladin, které můžeme označit za *pás*. Pásky vznikají postupně, od nejvíce energeticky náročných po nejméně, což je zřejmé z obr. 13. Pro elektrickou vodivost je významný pouze pás *valenční*, který je ze všech nejširší. V případě lithia vzniká pás z energetické hladiny E_2 , ve které je však podle Pauliho principu (viz obr. 14) umístěn pouze jeden elektron, takže je polovina pásu volná (oblast 3 na obr. 13), proto se nazývá vodivostní pás (oblast 2 je pás valenční). Vzhledem k volnému místu v pásu může elektrické pole vybudit elektrony k obsazení tohoto pásu, ze kterého mohou cestovat od atomu k atomu, čímž dojde k vedení proudu. Skutečnosti popsané v tomto příkladu jsou platné pouze pro kovy s lichým počtem elektronů, což má za následek existenci vodivostního pásu přímo v rámci valenčního pásu. [14,34]



Obr. 14 Pauliho princip obsazování orbitalů [15]

Jiná situace nastává u prvků se dvěma valenčními elektrony. Ty by teoreticky vést proud neměly, jelikož mají plně obsazenou hladinu. Vysvětlení je viditelné na obr. 15. Hladina valenční $2s$ se překrývá s hladinou $2p$, která vytváří vodivostní pás 3. [14,34]



Obr. 15 Vznik energetických pásů v krystalu berylia [14]

Pásová teorie již dokáže vysvětlit většinu nesrovnalostí, které předchozí teorie nemohly. Jedná se především o vliv jiných prvků na pokles vodivosti daného kovu. Ten lze vysvětlit kontaminací vodivostního pásu elektrony z cizího prvku, které ubírají množství volných pozic pro přenos proudu. [14,34]

Podobným způsobem nastává i pokles při zvyšování teploty. Atomy z valenčního pásu jsou stále více vybuzené a přecházejí do vodivostního pásu, který více zaplňují a brání přístupu jiných elektronů. [14,34]

2.4 TEORIE BRILLOUINOVÝCH ZÓN

Pásová teorie dala vysvětlení většině otázek, které s vodivostí souvisí, a které nedokázaly předchozí teorie uspokojivě zodpovědět. Její slabinou je však fakt, že je uvažována jako jednorozměrný systém, kde se elektrony pohybují po přímce, nikoliv v prostoru, čímž dochází ke značnému zkreslení. [14,34]

Pro zavedení této teorie je třeba vyjít z několika veličin, charakterizujících elektron. Za prvé je to vztah pro jeho kinetickou energii

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (2.6)$$

a druhý dle rovnice de Broglieho vztah pro vlnovou délku λ dává rovnici

$$\frac{1}{\lambda} = C \cdot E^{1/2} \quad (2.7)$$

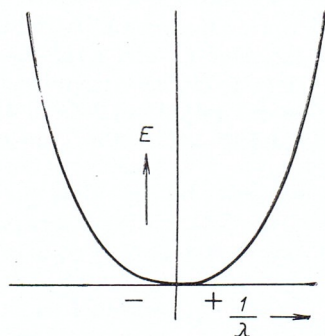
Platí, že konstanta C se rovná

$$C = \frac{\sqrt{2m}}{h} \quad (2.8)$$

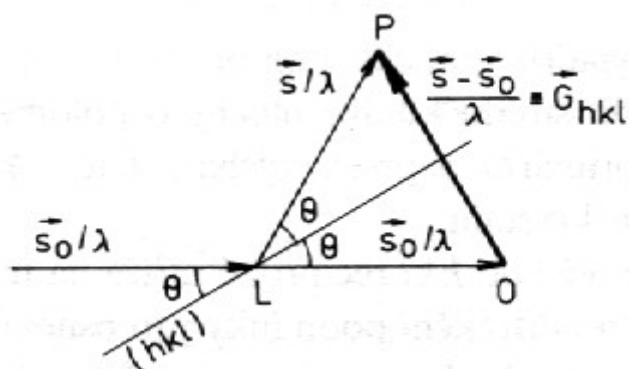
Hodnota $1/\lambda$ se jmenuje vlnčet a vztah 2.7 je znázorněn grafem na obr. 16.

Jak již bylo řečeno, chová se elektron jako těleso i jako vlnění, takže je, podobně jako rentgenové záření, difraktován mřížkou kladných iontů. Taktéž difrakční podmínka je stejná jako u rentgenového záření, čili se jedná o Braggovu reflexní podmínku, kterou lze vyjádřit rovnicí

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta \quad (2.9)$$

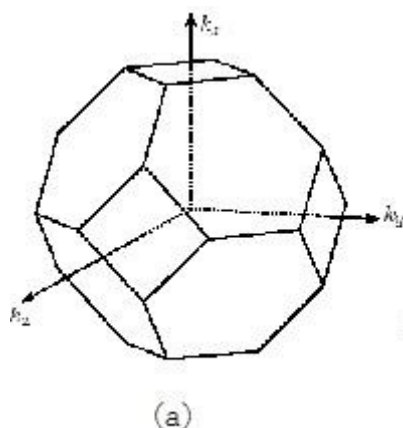


Obr. 16 Energie elektronu, který se pohybuje v konstantním silovém poli [14]

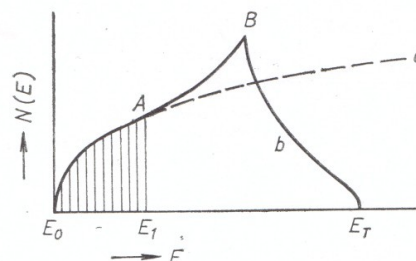


Obr. 17 Odvození Braggovy podmínky [16]

Pokud dochází k difrakci, čili má elektron kritickou vlnovou délku z rovnice 2.9, dojde k jeho odrazu od mřížkové roviny. Takto odražené atomy se nemohou podílet na vedení proudu, takže mezi energetickými hladinami vzniknou zakázané pásy ΔE , ve kterých se elektrony odrážejí od atomových rovin – viz. obr. 17. Při pohybu v trojrozměrném prostoru velmi záleží na směru pohybu elektronu, jelikož v různých směrech má různou hodnotu kritické vlnové délky λ . Vznikají zde oblasti, kde atomové roviny nezpůsobují odrazy elektronů – *Brillouinovy zóny*. Na obr. 18 je znázorněna zóna patřící k plošně středěné krychlové mřížce, jedná se o první Brillouinovu zónu, čili v rovnici 2.9 se $n=1$. [14,34]



Obr. 18 První Brillouinova zóna fcc mřížky [17]



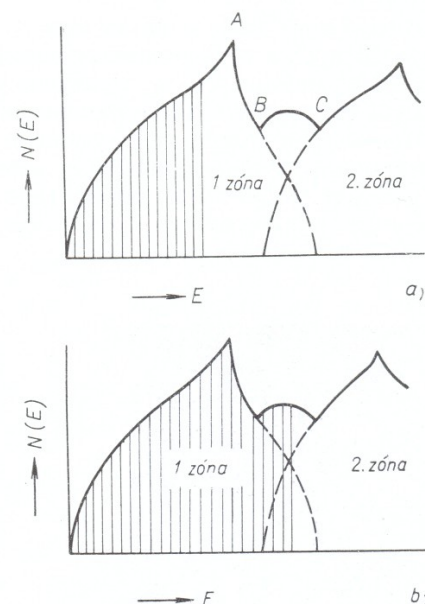
Obr. 19 Rozdělení hustoty energetických stavů v periodickém poli [14]

Pro pozorování energetických změn v zóně se využívá graf závislosti hustoty energetických stavů $N(E)$ na energii E -viz. obr. 19. Na rozdíl od kvantové teorie se zde nejedná o parabolu. Parabolický tvar křivka sleduje pouze do bodu A, odkud vzrůstá do svého maxima v bodě B a klesá na nulu v bodě E_T . Obsazenost zóny je znázorněna šrafováním útvaru.

Podobně jako u pásové teorie i u zón dochází k překrývání energetických zón. To znamená, že druhá zóna má energetické stavy, které jsou nižší než nejvyšší stav zóny první. Takto mohou elektrony postupně zaplňovat obě dvě zóny. [14,34]

Obr. 20 a, resp. b ukazují Brillouinovy zóny u jednomocných resp. dvoumocných kovů.

Tato teorie vysvětluje rozdílnost vedení proudu u různých prvků tím, že mají různě obsazenou první – valenční zónu. Nejvyšší vodivost pak mají kovy jednomocné – stříbro, zlato a měď – a také trojmocné (například hliník). Je to způsobeno relativně velkým množstvím volného prostoru už v první zóně, takže je volných mnohem více energetických stavů pro přenos elektřiny. U dvoumocných kovů pak záleží na směrech vlnových vektorů zón při překrytí. [14]



Obr. 20 Brillouinovy zóny u vodičů
a – jednomocný kov
b – dvoumocný kov [14]

3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ELEKTRICKOU VODIVOST V KOVECH

Z předchozí kapitoly je jasné, že elektrickou vodivost bude ovlivňovat vše, co narušuje ideální stav valenční a vodivostní vrstvy všech atomů v krystalové mřížce. V praxi jsou to především poruchy materiálu a znečišťující prvky. [13]

3.1 PORUCHY V MATERIÁLU

V materiálu každá nepravidelnost a odchylka od ideálního stavu mřížky způsobuje změnu napěťových polí, která způsobí snížení vodivosti.

Velký podíl z těchto poruch zaujímají hranice zrn a bodové poruchy, naproti tomu je vliv dislokací menší. [13]

Pro měď byly určeny hodnoty nárůstu měrného odporu, resp. měrné elektrické vodivosti pro jednotlivé bodové poruchy následovně: [13]

| | |
|--|--|
| monovakance - | $1,50 \cdot 10^{-2} \mu\Omega \text{ m/ at. \%}$ |
| divakance – | $1,35 \cdot 10^{-2} \mu\Omega \text{ m/ at. \%}$ |
| vakance ve smyčkách o 100 vakancích – | $0,69 \cdot 10^{-2} \mu\Omega \text{ m/ at. \%}$ |
| vakance ve smyčkách o 1000 vakancích – | $0,34 \cdot 10^{-2} \mu\Omega \text{ m/ at. \%}$ |
| intersticiál – | $2,00 \cdot 10^{-2} \mu\Omega \text{ m/ at. \%}$ |

Z výše uvedených hodnot plyne, že nejvíce ovlivní vodivost intersticiál, monovakance a divakance, zatímco když jsou vakance pohromadě, tak vliv jednotlivých vakancí klesá, nicméně ve výsledku mají vliv velký, ale stále menší než 100, resp. 1000 jednotlivých monovakancí.

Míru vlivu dislokací je možné odvodit pomocí vztahů. Nárůst odporu pro hranové i šroubové dislokace se vyjadřuje vztahem:

$$\Delta \rho = n_d \cdot 0,6 \cdot 10^{-16} \quad (3.1)$$

kde n_d je hustota dislokací

Pro rozštěpené dislokace existuje vztah

$$\Delta \rho = n_d \cdot 23 \cdot 10^{-16} \quad (3.2)$$

Speciálně pro kovy s vysokou vodivostí, jmenovitě zlato, stříbro a měď je uváděn výraz

$$\Delta \rho = 0,5 \cdot 10^{-7} \beta \quad (3.3)$$

přičemž β je povrch vrstevné chyby na 1 cm^3 .

Vliv hranic zrn je značný. Pro příklad uveďme srovnání dvou vzorků mědi. První vzorek je monokrystal, který má při teplotě 4 K měrný odpor $3 \text{ až } 9 \cdot 10^{-3} \text{ n}\Omega \text{ m}$, druhým je polykrystalický vzorek, vyžíhaný při 1000°C s měrným odporem $6 \text{ až } 9 \cdot 10^{-1} \text{ n}\Omega \text{ m}$. Z těchto hodnot lze snadno vyčíst silný vliv hranic zrn na zvýšení elektrického odporu v řádu stovek nanoohmů na metr. [13]

Také tváření za studena má zřetelný vliv na elektrickou vodivost. Při deformování materiálu dochází ke koncentrování vzniklých poruch, zejména pak vzrůstá hustota dislokací. Vliv těchto pochodů ve velké míře závisí na složení materiálu a také na teplotě a podmínkách deformování. Pro představu, při deformaci 30 až 60% za normálních podmínek a teplot dojde ke snížení vodivosti o 2 až 6%. [13]

Tyto změny lze také kvantifikovat určitými vzorci. Přírůstek odporu vyjádříme na základě Matthiesenaova pravidla vztahem

$$\Delta \rho = \rho_v n_v + \rho_d n_d \quad (3.4)$$

ve kterém ρ_v , ρ_d jsou přírůstky odporu od jedné vakance, resp. jednotky délky dislokace a n_v , n_d je počet vakancí, resp. délka dislokace.

Vzhledem k tomu, že hustota poruch je úměrná míře deformace ε , platí obecnější vzorec

$$\Delta \rho = B_p \cdot \varepsilon^p + B_q \cdot \varepsilon^q \quad (3.5)$$

Konstanty B_p a B_q jsou úměrami příspěvků od jednotlivých typů poruch. Hodnoty exponentů p a q jsou proměnné a nabývají hodnot p od $3/2$ po $5/4$ a q od $1/2$ po $3/4$.

Pro konstantu B_p byl odvozen výraz:

$$B_p = \rho_v \cdot A \cdot f \cdot b_s^2 \quad (3.6)$$

kde

A je konstanta řádu 10^{11}

f je součinitel, který dává počet stupňů pro vznik vakance

b_s je vzdálenost mezi dvěma jednotlivými stupni [m]

Pro konstantu B_q existuje vztah

$$B_q = A \cdot \rho_d \quad (3.7)$$

kde

$$\rho_d = D \cdot v_a^{2/3} \cdot b^2 \cdot n_d \quad (3.8)$$

kde

D je konstanta všech neproměnných veličin nezávislých na teplotě

v_a je atomový objem [m^3]

b je Burgersův vektor. [13]

Také elastické deformace mají vliv na elektrickou vodivost. Vlivem vyvolaného tlaku dochází k nárůstu vodivosti, neboť jsou umenšovány tepelné kmity atomových mřížek a také se zvětšuje množství elektronů v jednotce objemu. V praxi se těchto skutečností využívá u odporových tenzometrů – obr. 21.

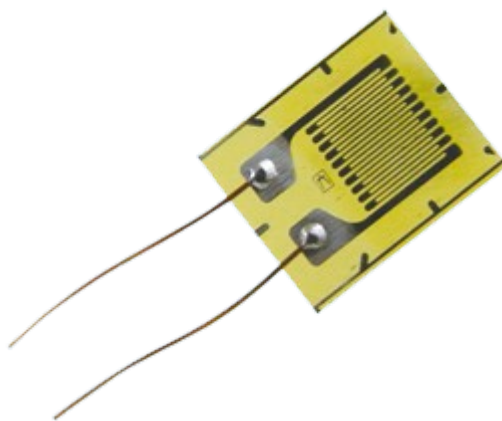
V oblasti deformací pružných lze změnu odporu vyjádřit vzhledem ke změně délky a průřezu přibližným vztahem

$$\frac{dR}{R} = c \cdot \varepsilon \quad (3.9)$$

kde

ε je změna délky

c je konstanta úměrnosti – nabývá hodnot 2 až 2,5. [13]

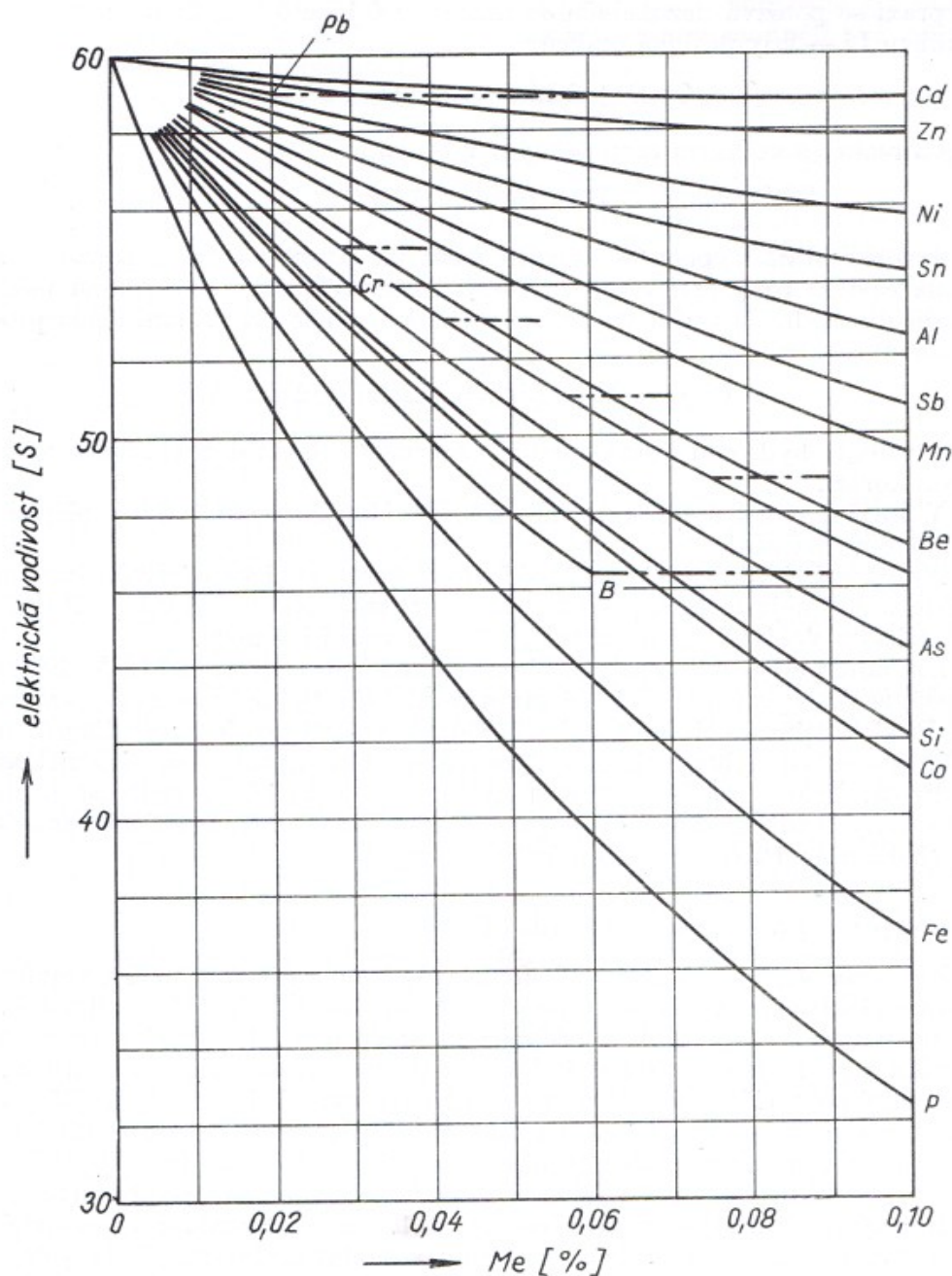


Obr. 21 Odporový tenzometr [18]

3.2 VLIV PŘÍMĚSÍ NA ELEKTRICKOU VODIVOST MĚDI

Všechny prvky, které se vyskytují v měděném materiálu negativně ovlivňují možnost vést elektrický proud. V předcházející kapitole bylo vysvětleno, že za vedení proudu je zodpovědná valenční a vodivostní vrstva elektronů každého atomu mědi. Když tedy do této soustavy vstoupí prvky, které tvoří s mědí tuhý roztok, zaplňují volný vodivostní pás a snižují tak vodivost. Naproti tomu prvky, které se v mědi nerozpouští nemají vliv tak významný. [19]

Obr. 22 ukazuje, že největší vliv na snížení elektrické vodivosti mají především fosfor, železo, do jistého množství bór, kobalt a křemík. Mezi naopak mírně škodlivé prvky, z hlediska elektrické vodivosti, můžeme řadit olovo, kadmium a zinek.



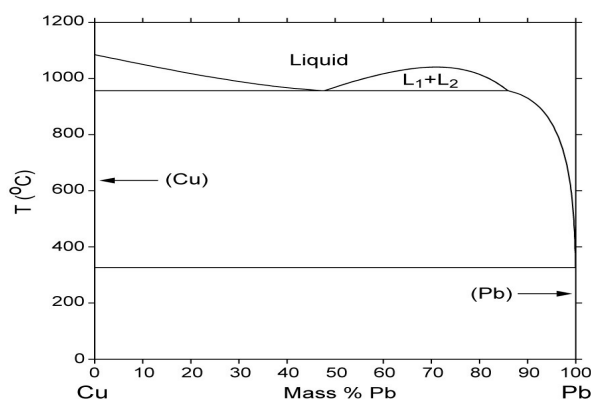
Obr. 22 Vliv příměšenin Me v % na elektrickou vodivost mědi S [22]

3.2.1 PRVKY NEROZPUSTNÉ V MĚDI

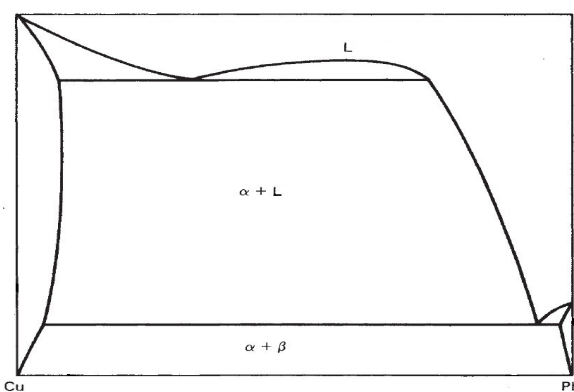
Tyto prvky, jak již bylo řečeno, se v mědi nerozpouští, resp. rozpouští ve velmi malém množství (do 0,02%_{hmot}). Následný vznik krystalů čistého prvku nemá příliš silný účinek na elektrickou vodivost čisté mědi.

Olovo

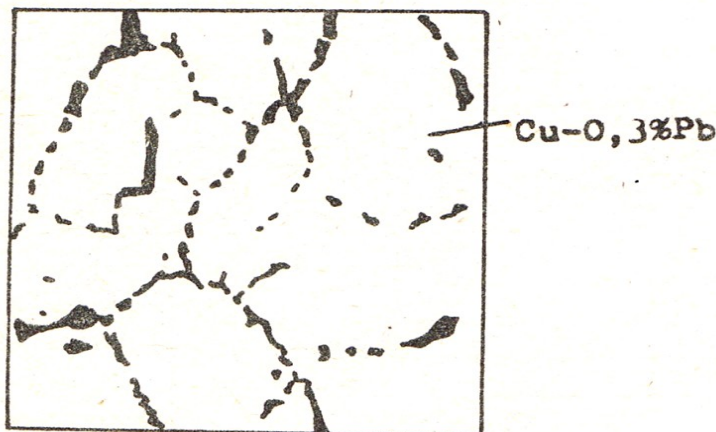
Olovo s mědí tvoří binární diagram Cu-Pb s maximální rozpustností olova při 326°C 0,06%_{hmot}. Rozpustnost s teplotou klesá až na 0,007%_{hmot} při 20°C. Z obr. 23 je názorně vidět tvar diagramu, zatímco obr. 24 dává představu o oblastech téměř čistých kovů. Samotné olovo se ve formě čistých krystalů vylučuje na hranicích zrn jako skoro souvislé sítoví – viz obr. 25. Vzhledem k nízké teplotě tavení způsobuje olovo potíže při tváření za tepla, kdy dochází k natavení eutektika i čistých krystalů, což má za následek vznik povrchových trhlin. [2,20,21].



Obr. 23 Binární diagram Cu-Pb [1]



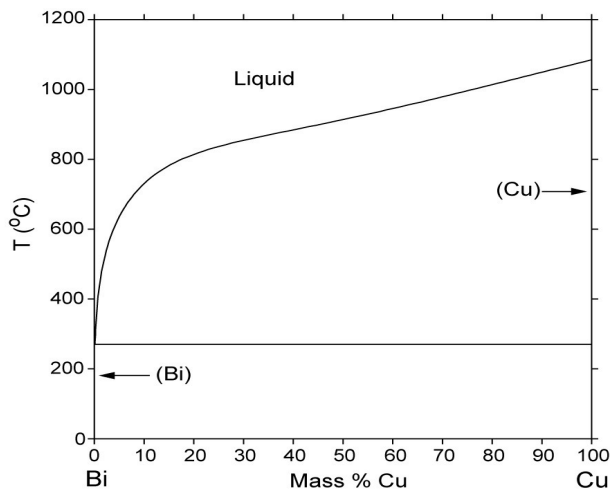
Obr. 24 Schematický diagram Cu-Pb [23]



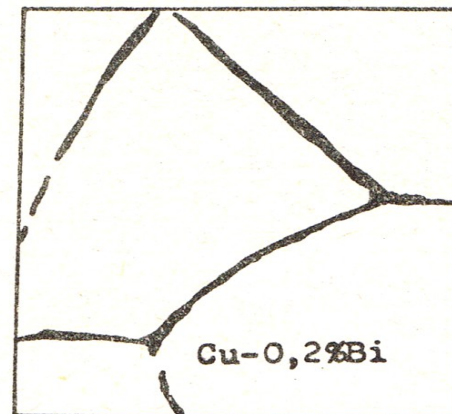
Obr. 25 Mikrostruktura lité mědi s přísadou 0,3% Pb [19]

Bismut

Podobně jako olovo se i bismut v mědi nerozpouští, maximální rozpustnost bismutu v mědi při teplotě 270,6°C je 0,2%_{hmot} Bi (obr. 26). Stejně jako olovo způsobuje problémy při tváření za tepla, avšak s větší intenzitou. Při vyšším obsahu Bi bylo pozorováno i zkřehnutí za obvyklých teplot, které je způsobeno vyloučením částic bismutu na hranicích zrn – viz. obr. 27. [2,19,20,21]



Obr. 26 Binární diagram Cu-Bi [24]



Obr. 27 Mikrostruktura lité mědi s přísadou 0,2% Bi [19]

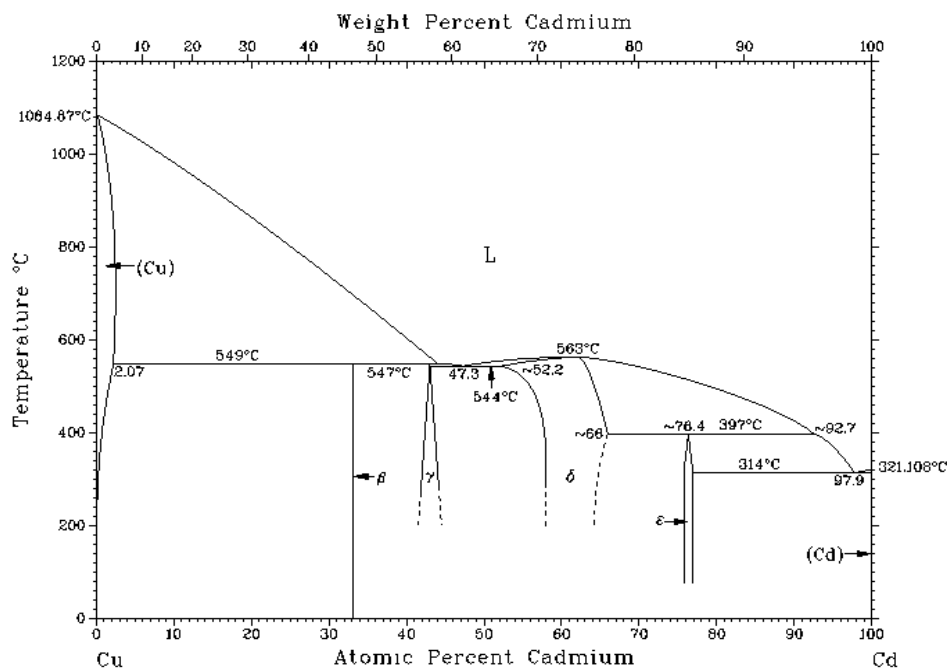
Dalšími ze skupiny těchto nerozpustných prvků jsou také tellur a selen. [19]

3.2.2 PRVKY ROZPUSTNÉ V MĚDI MÉNĚ OVLIVŇUJÍCÍ ELEKTRICKOU VODIVOST

Tyto prvky sice snižují elektrickou vodivost, nicméně za cenu určitého snížení mohou materiálu dodat významné zlepšení jiných vlastností, zejména pevnost.

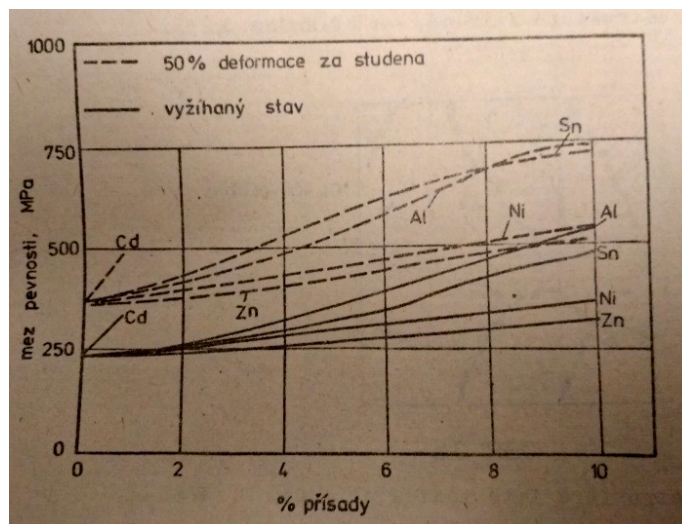
Kadmium

Kadmium tvoří s mědí diagram s větším množstvím možných fází chemických sloučenin. Jelikož k elektrovedným účelům se používají pouze slitiny s obsahem kadmia do 1%, zajímá nás pouze levý okraj diagramu (obr. 28). Kadmium má maximální rozpustnost 2,07% při teplotě 549°C, přičemž rozpustnost klesá téměř k nule mezi 250 až 200°C. [1]



Obr. 28 Binární diagram Cu-Cd [25]

Jak je patrné z obr. 29 má kadmium pozitivní vliv na pevnost slitiny, přičemž při daném množství do 1%_{hmot} dojde ke snížení IACS asi o 10%, zatímco mez pevnosti vzroste z 250 MPa až na 350 MPa ve vyžehnaném stavu. Při deformaci za studena jsou tyto hodnoty až 500 MPa. Tyto slitiny se při obsahu do 0,2% Cd používají pro výrobu komutátorových lamel, vyšší obsahy až do 1% pak pro výrobu drátů. [19]

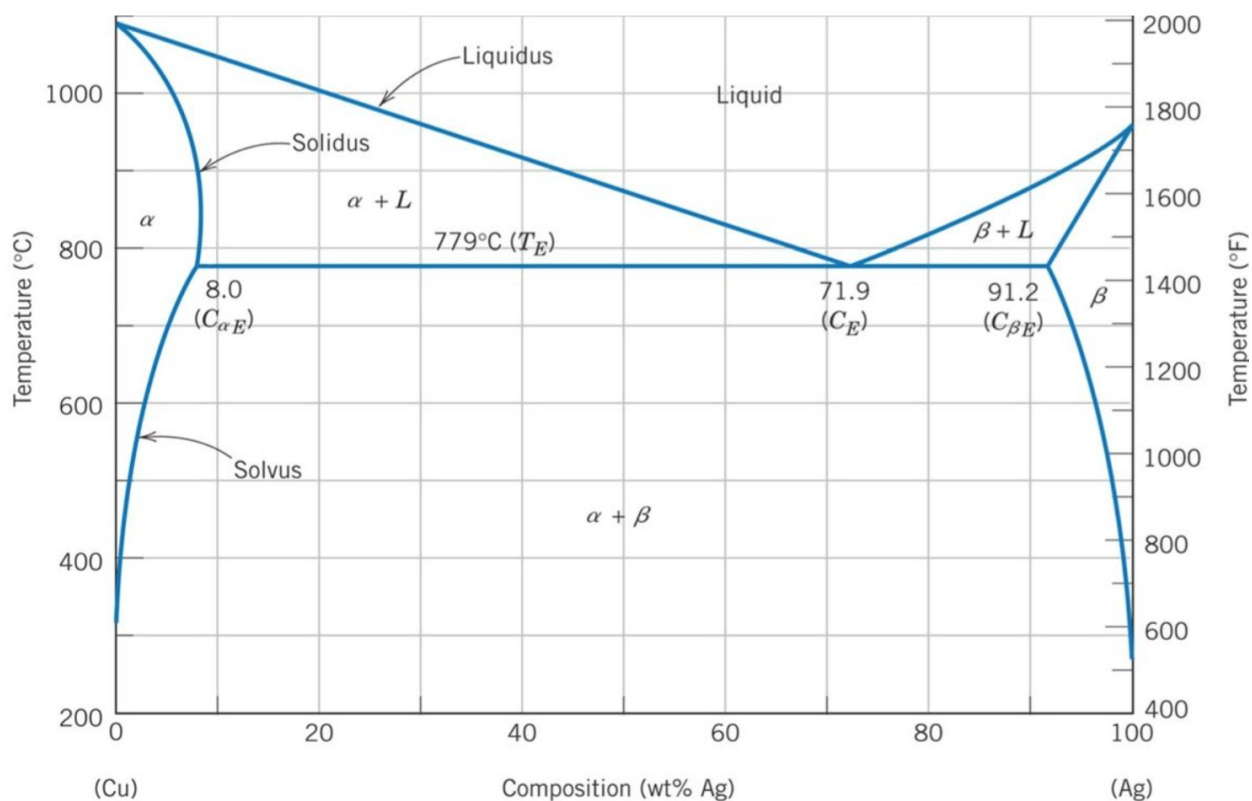


Obr. 29 Vliv přísad na změny meze pevnosti mědi [19]

Stříbro

Stříbro tvoří s mědí jednoduchý binární diagram, s eutektickým bodem při teplotě 779°C a 71,9% stříbra – viz obr. 30. Maximální rozpustnost stříbra v mědi je při eutektické teplotě 8,0%. Tato rozpustnost s teplotou při 300°C klesá k nule.

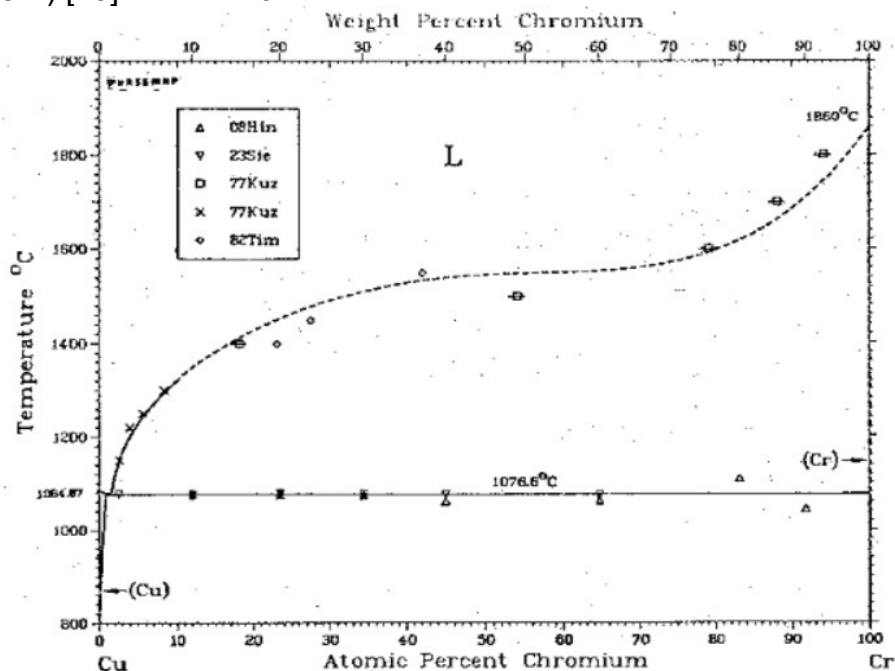
Jako elektrovodné se využívají slitiny s obsahem stříbra do 0,5%. Tyto slitiny jsou z hlediska struktury jednofázové. [2]



Obr. 30 Binární diagram Cu-Ag [26]

Chrom

Chrom je v mědi v tuhém stavu téměř nerozpustný. Maximální rozpustnost je při teplotě 1076°C 0,73% [1] (dle [20] 0,65%) a s teplotou klesá při 400°C blízko k nule (0,05%) [20]- viz. obr. 31



Obr. 31 Binární diagram Cu-Cr [27]

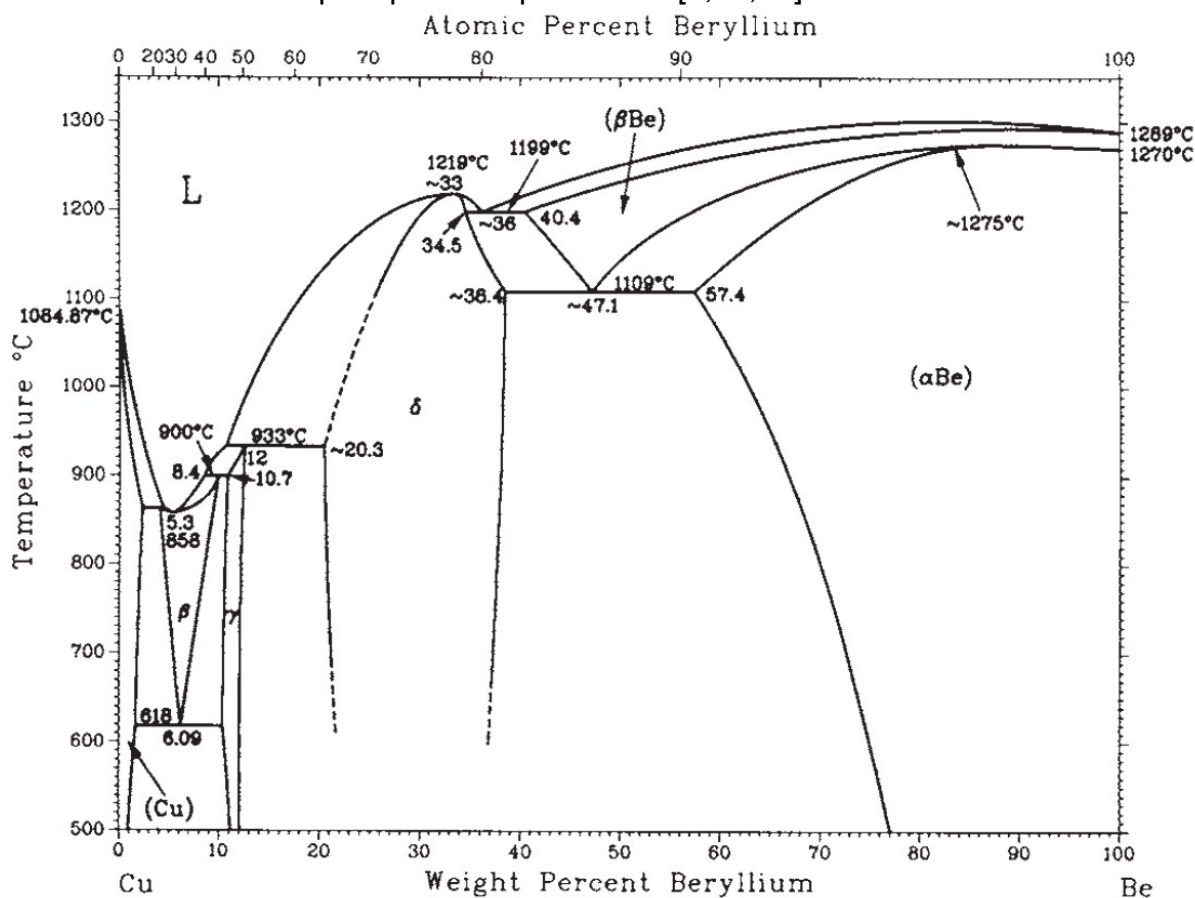
Tohoto prvku je užíváno od 0,4 do 1%, přičemž je možné vlastnosti výrobků velmi příznivě ovlivnit pomocí tepelného a mechanického zpracování. Při dobré tepelné vodivosti dosahují přijatelných pevnostních vlastností. Podobně jako kadmiové slitiny se tyto slitiny užívají pro komutátorové lamely, dále také jako materiál elektrod, dýz plazmových hořáků a také odlévaných struskových výpustí vysokých pecí chlazených vodou. [2, 20]

Beryllium

Beryllium s mědí vytváří dosti složitý systém, ve kterém vzniká velké množství různých fází chemických sloučenin – viz. obr. 32. Největší rozpustnost má beryllium v mědi při peritektické reakci za teploty 886°C a 2,7% Be. Se snižující se teplotou poté rozpustnost klesá až na 0,2% při teplotě 200°C. [20]

Slitiny mědi a berylia vykazují velmi příznivé mechanické vlastnosti. Ve skutečnosti jsou mezi měděnými slitinami nejpevnější, přičemž si zachovávají přijatelnou míru elektrické vodivosti s ohledem na jejich použití. Pro elektrotechnické účely se užívá 0,25 až 0,75% Be. Jejich výroba a zpracování je značně náročné a také drahé. Tyto skutečnosti způsobuje nejen vysoká cena berylia, ale také silně toxické a karcinogenní vlastnosti. Odlévání také komplikuje relativně široký interval tuhnutí – viz. obr. 32. S ohledem na segregaci Be doprovází výrobu také homogenizační žihání. Následuje teplotní vytvrzování, pro maximální elektrickou

vodivost při 470 až 490°C. Beryliové bronzy jsou také často legovány niklem, kobaltem a titanem [19], které poskytují větší pevnost než binární slitina a také brání nechtěnému růstu zrn při tepelném zpracování. [2,20,28]



Obr. 32 Binární diagram Cu-Be [1]

Tyto bronzy se s výhodou používají na namáhané části, například pružiny a pružinové kontakty. Díky únavové odolnosti se také aplikují pro konstrukční díly v elektrotechnice, které jsou cyklicky namáhané. Dalším velmi výhodným prostředím pro jejich aplikaci jsou prostory, kde hrozí rizika požáru či výbuchu, jelikož výrobky z těchto slitin při nárazech nejiskří. [14,19]

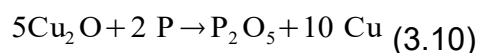
3.2.3 PRVKY ROZPUSTNÉ V MĚDI SILNĚ OVLIVŇUJÍCÍ ELEKTRICKOU VODIVOST

Prvky tohoto typu vytváří v mědi tuhé roztoky, které způsobují rapidní pokles elektrické i tepelné vodivosti.

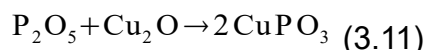
Fosfor

Fosfor tvoří s mědí hned několik různých sloučenin, v závislosti na množství fosforu – viz. obr. 33. Maximální rozpustnosti dosahuje při eutektické teplotě 987 K, resp. 714°C v systému Cu-Cu₃P v množství 3,5%. S klesající teplotou dosahuje rozpustnost 0,6% při teplotě 300°C. [1,20]

Tento prvek je často užívaným dezoxidovadlem pro slitiny mědi, u kterých není třeba zajistit elektrovodné vlastnosti. Jeho dezoxidační vlastnosti jsou tak silné, že při užití 0,05% fosforu lze zjistit, že množství kyslíku v tavenině je menší než 0,001%. Pro tyto účely se užívá předslitin s obsahem 10 až 15% fosforu. Dochází k reakci

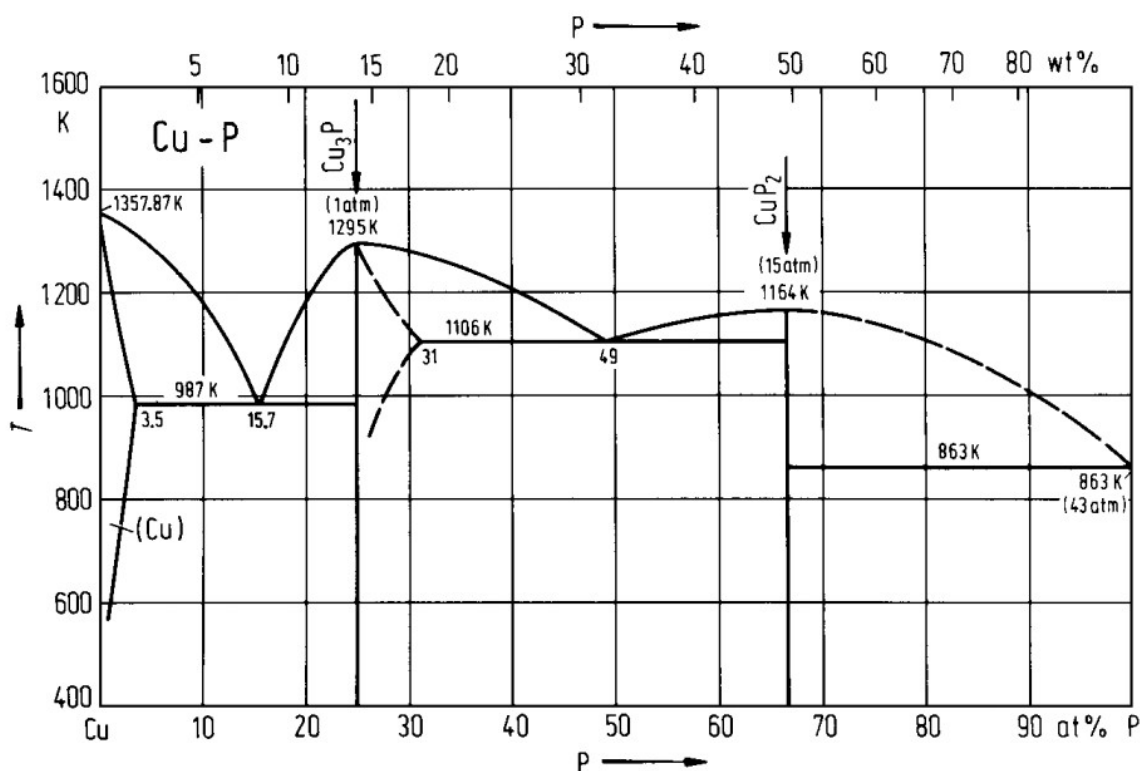


vzniklý oxid fosforečný probublává taveninou a dál reaguje s Cu_2O :



Tekutý fosforečnan měďný vyplouvá na hladinu ve formě kapiček [21]

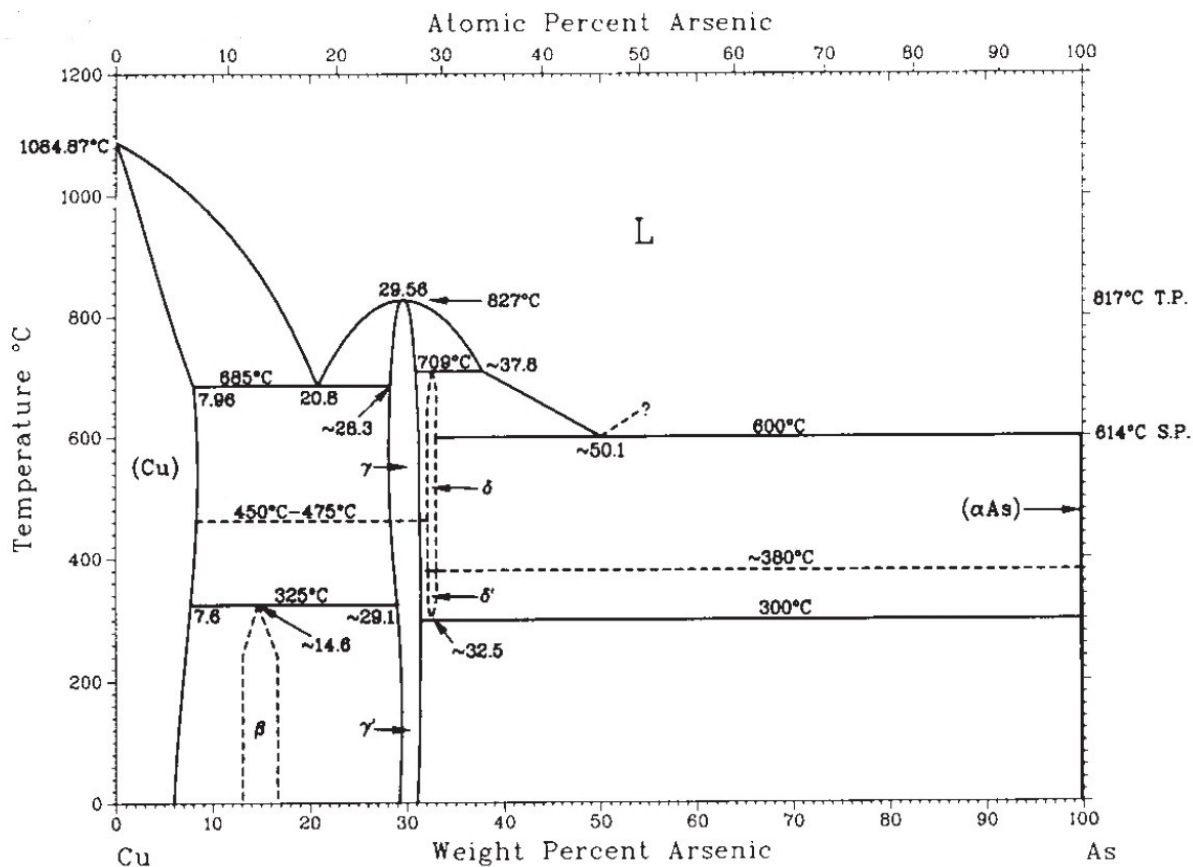
Z obr. 33 je patrné, že fosfor je v mědi částečně rozpustný. Velkým problémem je vliv na elektrickou vodivost. Z obr. 22 je zřejmé, že fosfor velmi rapidně vodivost snižuje. Při 0,1% se IACS snižuje na přibližně 55% původní hodnoty. [1,20]



Obr. 33 Binární diagram Cu-P [29]

Arsen

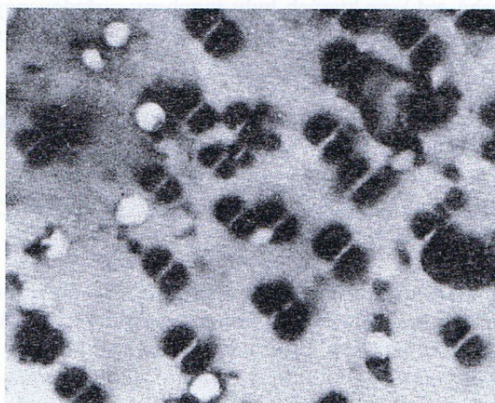
Arsen společně s mědí vytváří sloučeninu Cu_3As , která je rozpustná přibližně do 8% As při eutektické teplotě 685°C a s teplotou klesá na přibližně 6% při pokojové teplotě – viz. obr. 34. Již v malém množství arsen příznivě ovlivňuje pevnostní vlastnosti, především pevnost, ale také odlonost proti únavě materiálu. Zároveň se také zvyšuje rekrytalizační teplota a to velmi rychle – při 0,1% As se zvýší až o 50°C , při větším množství až o 100°C . Z těchto důvodů se arsenu užívá jako legury do 0,5%. Vzhledem k silnému snižování vodivosti se pro elektrovodné materiály nepoužívá – viz. obr. 22.[2]



Obr. 34 Binární diagram Cu-As

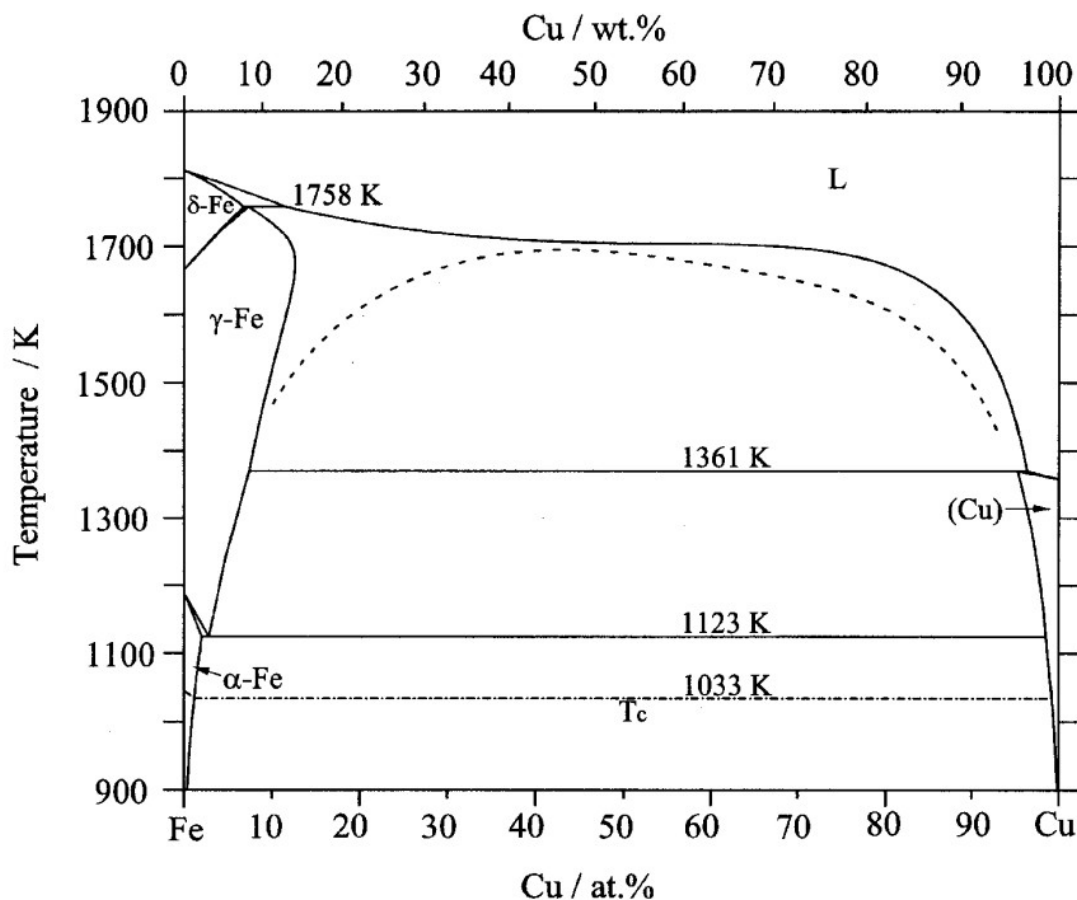
Železo

Železo hned po fosforu a křemíku nejvíce snižuje elektrickou vodivost (obr. 22). Do obsahu 0,2% nemá vliv na mechanické vlastnosti. Nad tímto množstvím se vylučují koherentní precipitáty, čímž dojde ke zvýšení mechanických vlastností. Pomocí transmisního elektronového mikroskopu (TEM) byly tyto precipitáty pozorovány jako útvary podobné svým tvarem motýlím křídům – viz. obr. 35. [2,20]



Obr. 35 Precipitáty Fe ve slitině CuFe₃
(zvětšeno 50 000x) [2]

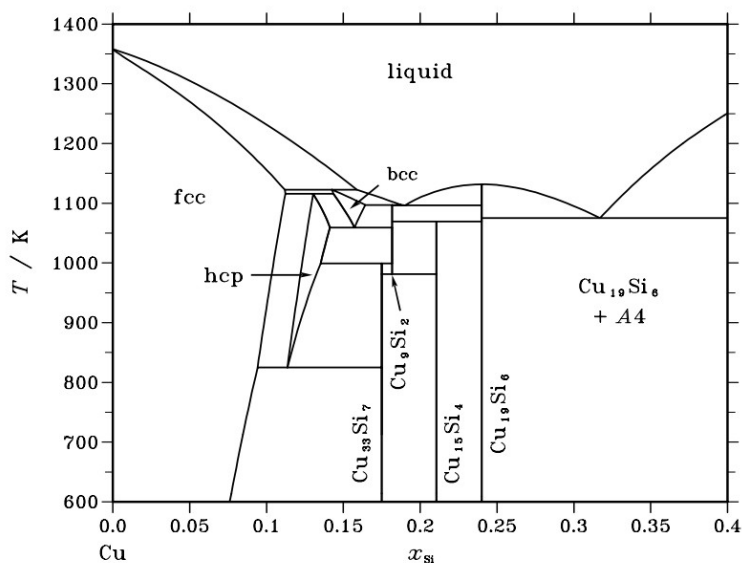
Železo může být dle [22] použito pro navázání fosforu v tavenině do Fe_2P . Tak je snížen vliv obou prvků na vodivost, neboť vznikne nová, v mědi nerozpustná fáze. [2,20]



Obr. 36 Binární diagram Fe-Cu [30]

Křemík

Křemík tvoří s mědí systém velmi složitý bohatý na velké množství různých sloučenin typu Cu_xSi_y . Maximální rozpustnost Si se pohybuje těsně nad 0,1% při teplotě 1100°C a s teplotou klesá – viz. obr. 37.



Obr. 37 Binární diagram Cu-Si [31]

Z obr. 22 je vidět, že křemík velmi silně snižuje elektrickou vodivost. Dle [21] je možné jej použít jako dezoxidovadlo. [20,21]

Dle obr. 22 do této skupiny prvků silně snižujících elektrickou vodivost patří také kobalt a do jisté míry i bór a antimon.[20,21]

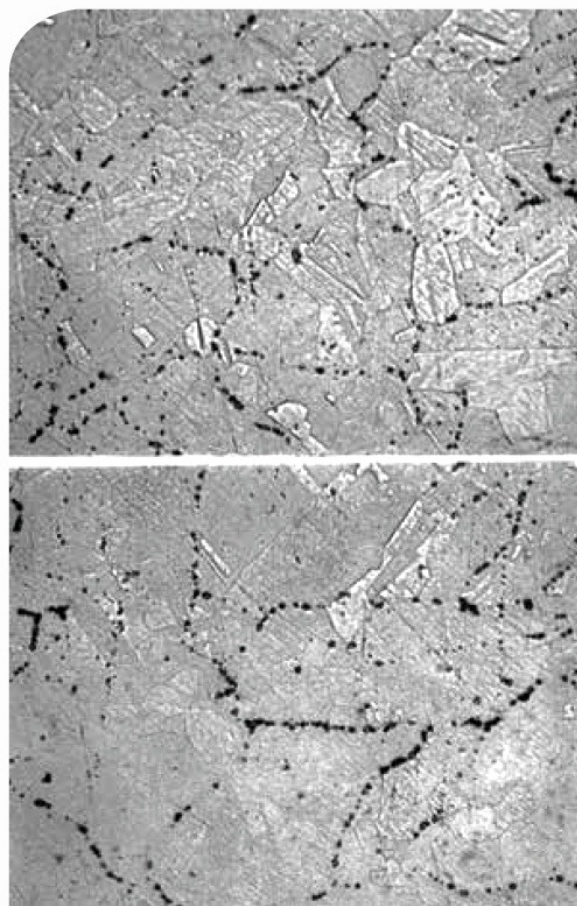
3.2.4 NEKOVOVÉ PRVKY NEVÝZNAMNĚ OVLIVŇUJÍCÍ ELEKTRICKOU VODIVOST

Tyto prvky samy o sobě významně vodivost nesnižují, ale mohou způsobit vznik bublin či poruch materiálu, které tak snižují účinný průřez tělesa a tím mohou vodivost snížit.

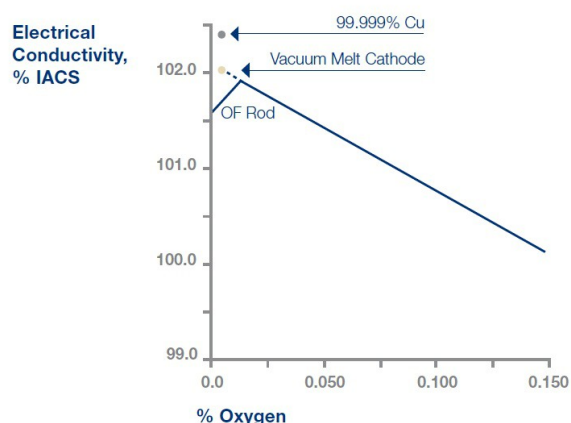
Kyslík

Kyslík v mědi vytváří dvě možné sloučeniny: CuO a Cu_2O . Oxid měďnatý ale při teplotách nad 1000°C podléhá tepelné disociaci, takže praktický význam v tavenině má pouze oxid měďný. Eutektikum soustavy Cu-O je tvořeno mědí, ve které jsou jako oblé vměstky uloženy částice Cu_2O – obr. 38.

Větší množství kyslíku nepředstavuje pro elektrovodnou měď z hlediska vodivosti příliš velký problém, neboť kyslík ji snižuje relativně málo, dokonce dle obr. 39 ji ve velmi malém množství nepatrně zvyšuje. Velkým problémem je však vliv na mechanické vlastnosti. Nejvíce je zhoršená tažnost, zúžení a ohyb, zatímco pevnost a tvrdost příliš ovlivněny nejsou. Pro výrobu jemných drátů se proto používá měď zbavená kyslíku – OFHC(C) (oxygen free high conductivity copper) [14,20,22]

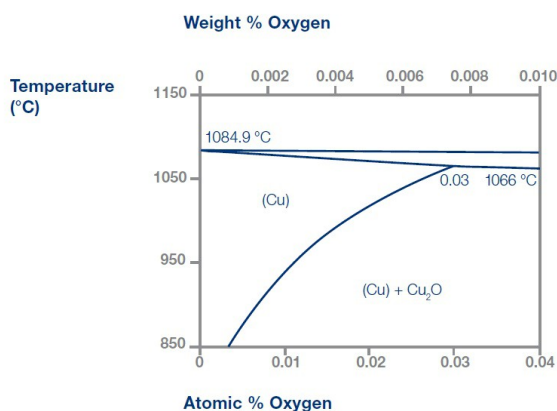


Obr. 38 Oxidy v mědi [32]

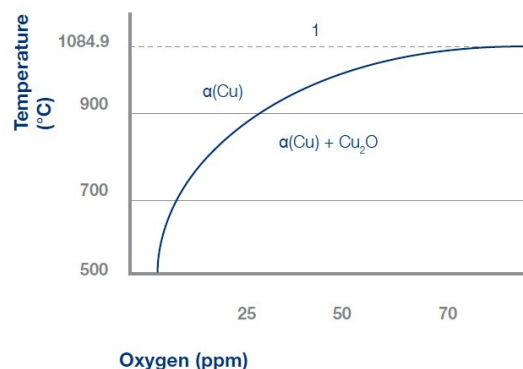


Obr. 39 Vliv množství kyslíku na elektrickou vodivost [32]

Dalším velkým problémem je omezená rozpustnost kyslíku – maximální při teplotě 1066°C je 0,03% (obr. 40). Jelikož s teplotou klesá - řádově se při pokojové teplotě jedná o jednotky ppm (obr. 41) - dochází při větším množství rozpuštěného kyslíku ke tvorbě eutektika, případně bublin v odlitku.

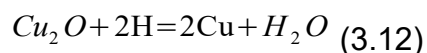


Obr. 40 Část binárního diagramu Cu-O [32]



Obr. 41 Detail binárního diagramu Cu-O [32]

Neméně závažným problémem je reakce Cu_2O s vodíkem. Při teplotách nad 400°C může vodík difundovat materiálem, kde reaguje s oxidem měďným za vzniku vodní páry.

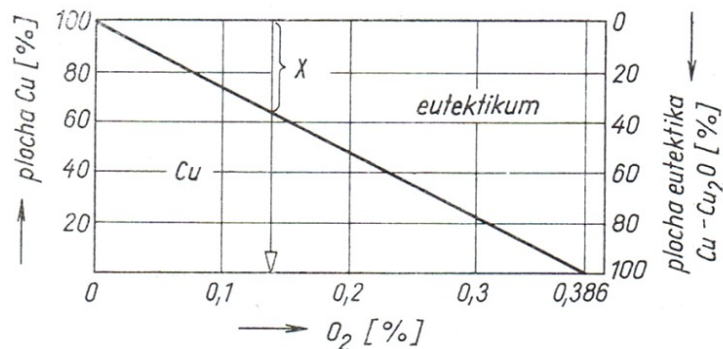


Molekuly vodní páry jsou příliš velké a nemohou difundovat z místa vzniku pryč, dochází ke vzniku pnutí, které dává vzniknout trhlinám v odlitku, především v povrchových vrstvách. Tento jev se nazývá vodíková nemoc. [14,22]

Množství kyslíku obsaženého v materiálu lze zjistit pomocí metalografického výbrusu. Eutektikum obsahuje 3,4% Cu_2O , což znamená 0,386% O_2 [22]. Pokud tedy plocha eutektika na výbrusu je X, tak množství kyslíku Y se rovná

$$Y = \frac{X \cdot 0,386}{100} \quad (3.13)$$

Druhou možností je využití grafu – obr. 42. Princip je velmi jednoduchý, na přímce najdeme bod, který odpovídá hodnotě X plochy výbrusu a odečteme množství kyslíku ze stupnice. [22]

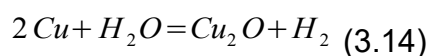


Obr. 42 Závislost množství eutektika Cu-Cu₂O na obsahu O₂ [22]

Vodík

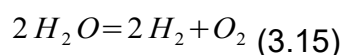
Z již uvedených skutečností vyplývá, že vodík, ač nemá přímý vliv na elektrickou vodivost mědi, je prvkem silně nežádoucím.

Do taveniny se dostává různými způsoby vždy ve formě vodní páry

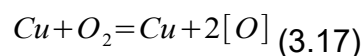
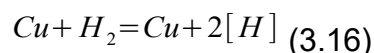


Z termodynamického hlediska dochází k těmto pochodům:

disociace vodní páry



rozpuštění vodíku a kyslíku v mědi



Z těchto rovnic můžeme odvodit vztah

$$[\text{H}] = A \sqrt{\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{[\text{O}]}} \quad (3.18)$$

kde hodnota rovnovážné konstanty A je funkcí teploty dle tabulky 3.1

[H] resp. [O] je obsah vodíku, resp. kyslíku rozpuštěného v mědi

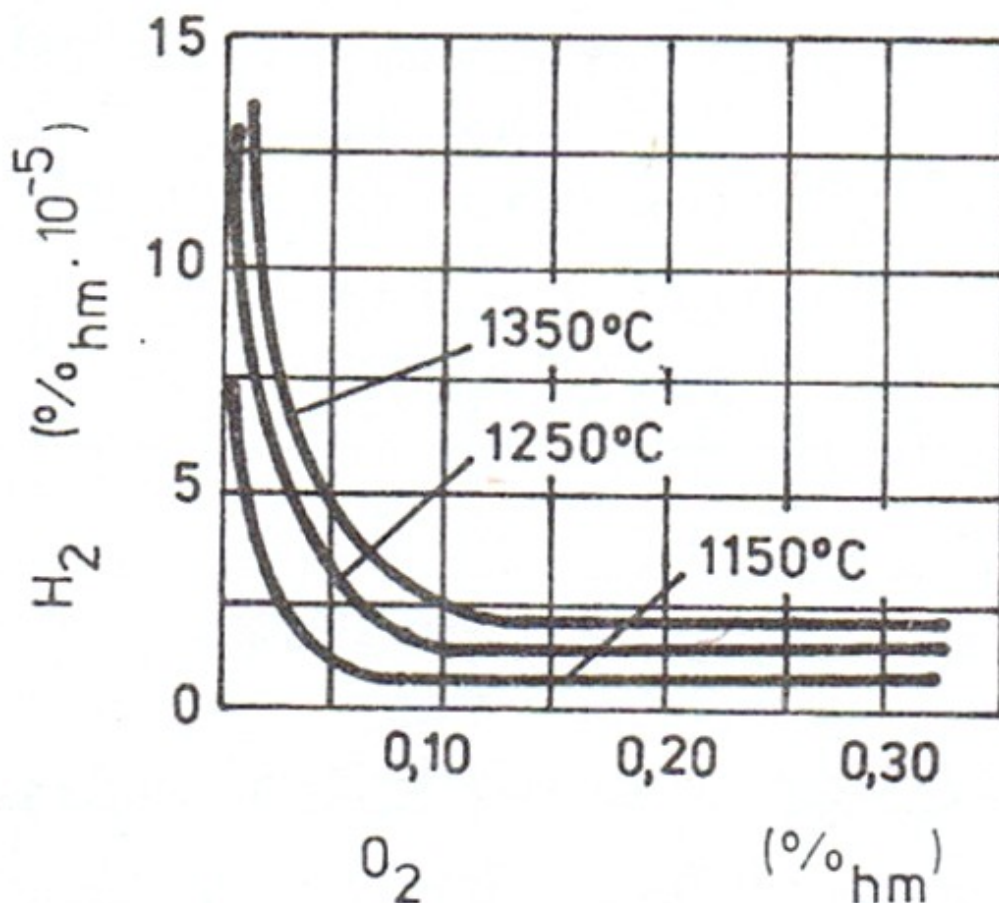
$p_{\text{H}_2\text{O}}$ je parciální tlak vodní páry v atmosféře nad hladinou.

Tabulka 3.1 Hodnoty konstanty A [22]

| Teplota [°C] | 1090 | 1150 | 1250 | 1350 |
|--------------|--------|-------|-------|-------|
| A | 0,0085 | 0,014 | 0,022 | 0,034 |

Z rovnice 3.18 je jasné, že čím méně kyslíku se nachází v tavenině, tím více může přijmout vodíku a naopak. [22]

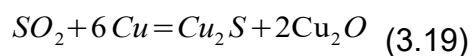
Z této závislosti tak vychází dva základní způsoby tavení mědi – redukční a oxidační. U redukčního způsobu je nutné předejít přítomnosti vodíku ve vsázce, protože je snižováno množství kyslíku a došlo by k naplynění vodíkem. Při oxidačním tavení je přítomný vodík z taveniny „vytlačen“ kyslíkem rozpuštěným v tavenině.



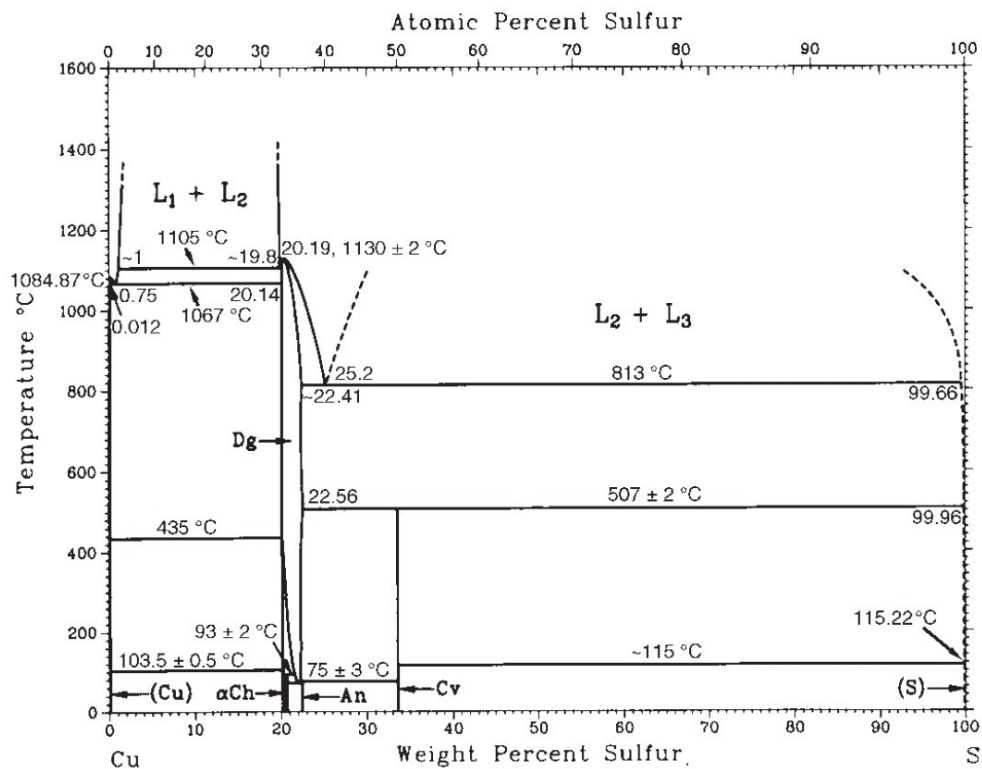
Obr. 43 Rovnovážná koncentrace kyslíku a vodíku v mědi při různé teplotě [20]

Síra

Nejvýznamější forma síry objevující se v roztavené mědi je oxid siřičitý SO_2 , jehož rozpustnost je vysoká, přesněji je úměrná odmocnině parciálního tlaku SO_2 v atmosféře. Rozpouštění probíhá reakcí



kde vznikají oxidy a sulfidy. Vzhledem ke koncentracím a teplotám probíhá tato reakce především zprava doleva, avšak při tuhnutí se koncentrace vlivem segregace zvyšuje a za nižších teplot dochází k obrácení směru reakce a naplynění odlitku. [22]

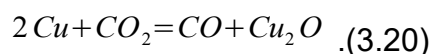


Obr.

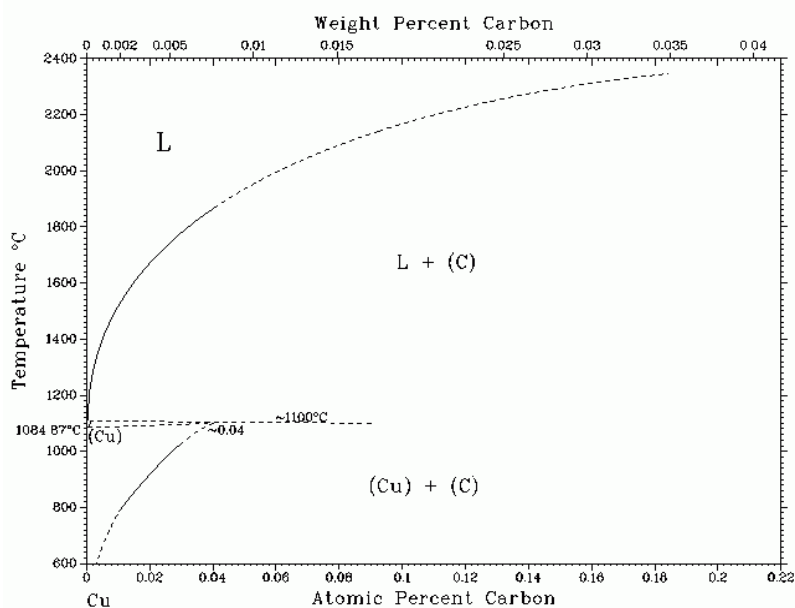
44 Binární diagram Cu-S [1]

Uhlík

Uhlík se do mědi dostává v podobě oxidů, které do taveniny vnášejí kyslík. Při teplotě nad 1000 °C dochází k reakci



Jelikož je disociační napětí mezi Cu_2O a CO_2 menší než mezi Cu_2O a vodní párou, okysličuje se tavenina oxidem uhličitým více než párou. Dalším problémem je, že oxid uhelnatý z taveniny uniká mnohem jednodušeji než pára, čili nemůže dojít ke zpětné reakci zprava doleva. [22]



Obr. 45 Binární diagram Cu-C [33]

4 POSTUPY PŘI TAVENÍ ČISTÉ MĚDI

Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, je měď velmi náchylná a také citlivá na přítomnost především plynů vodíku a kyslíku a také prvků, které by silně snižovaly její elektrovedné vlastnosti. Je proto nutné vybírat vhodný tavící agregát ale také vhodnější a výhodnější postup tavení.

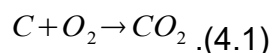
V dnešní době jsou již pece využívající elektrický proud možností vhodnější než pece na kapalná nebo tuhá paliva, u kterých při spalování vzniká množství různých zplodin a také vodní pára. [20]

Z hlediska pecní atmosféry se může jednat o tavení v redukční atmosféře, v inertním plynu na vzduchu (oxidační tavení) či ve vakuu.

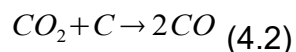
4.1 REDUKČNÍ ZPŮSOB TAVENÍ

U tohoto tavícího postupu se používá dřevěné uhlí, které musí být dobře vysušené. Uhlí se vkládá na dno tavícího kelímku, do mezer mezi vsázku i na hladinu, kde se vytvoří vrstva až 15 cm. Vsázka se vsází do kelímku předeřátého alespoň na 100°C pro odstranění vlhkosti. [22]

Při teplotách tavení mědi dochází k hoření uhlíku



Vzniklý oxid uhličitý je inertní vůči tavenině a při teplotách nad 1000°C dochází k jeho redukci



Vzniklá atmosféra redukuje měďné oxidy, takže čím více CO vzniká, tím nižší je výsledný obsah kyslíku v tavenině.

Vzhledem k již zmíněné rovnováze mezi kyslíkem a vodíkem v mědi je velmi důležité zamezit jakémukoliv kontaktu s vlhkostí, jelikož by došlo k pohlcování vodíku. Z tohoto důvodu je také nutné používat vsázku neobsahující vodík. [20,22] Tato skutečnost byla zkoumána při první experimentální tavbě, kdy vzniklé naplynění mělo demonstrovat rozdíl mezi zpracováním v atmosféře a ve vakuu

Klasický způsob

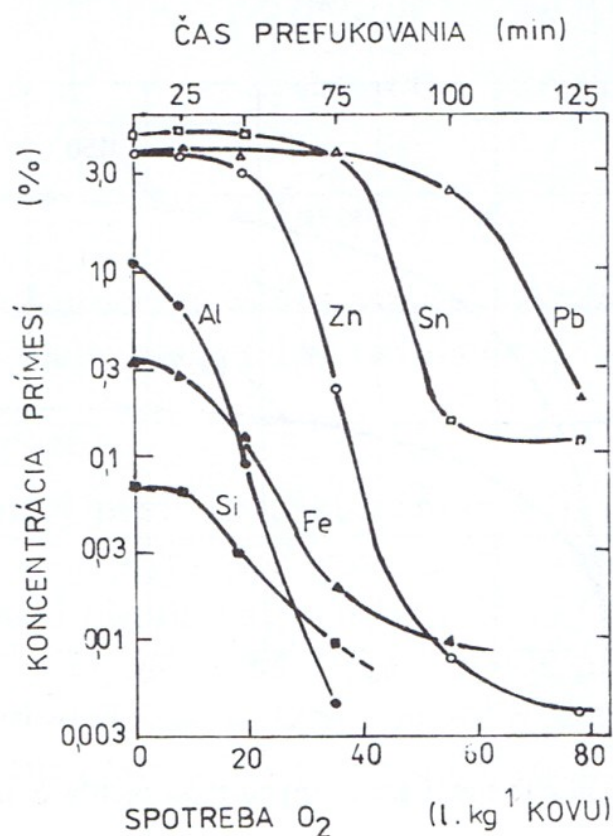
Tímto termínem označuje [22] v podstatě redukční způsob tavení, ale rozdílem je, že po natavení se užívá dezoxidovadel, jmenovitě křemíku, hořčíku, berylia a lithia.

4.2 OXIDICKÉ TAVENÍ

U tohoto postupu se záměrně zvyšuje obsah kyslíku, čímž na základě vztahu mezi vodíkem a kyslíkem dojde ke snížení množství vodíku v tavenině. Kyslík se do taveniny může dostávat buď mícháním taveniny (indukčně nebo mechanicky) nebo probubláváním. [20,22]

Díky probublávání může být tavenina zbavena příměsí, které se do ní dostaly. Děje se tak pomocí směsi kyslíku se vzduchem poměrem 6 : 1.[20] Na základě reaktivity s kyslíkem se následně tvoří oxidy různých nečistot – viz. obr. 46. [20]

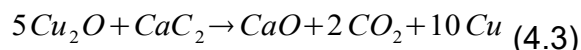
Obr. 46 říká, že nejlépe je odstranitelný hliník a zinek, ten však při značné spotřebě kyslíku. Do velké míry odstranitelnými prvky jsou také křemík a železo, zatímco cín a olovo nelze pod 0,15% z objemu taveniny odstranit.



Obr. 46 Snížení koncentrace příměsí v mědi oxidací kyslíkem [22]

Po dostatečném obohacení kyslíkem a tedy snížení množství vodíku následuje fáze dezoxidace. Pro dezoxidaci se mohou používat nerozpustná nebo rozpustná dezoxidovadla, která jsou účinnější.

K nerozpustným dezoxidovadlům se řadí především vápník. Dá se použít například ve formě karbidu vápníku CaC_2 , u kterého probíhá reakce



Rozpustnými dezoxidovadly jsou například lithium, bór, hořčík, zinek nebo mangan. [20]

Dezoxidace může probíhat několika různými způsoby.

4.2.1 BĚŽNÁ DEZOXIDACE

Tímto termínem se dá označit dezoxidace jakýmkoliv jedním prvkem, který zároveň nezpůsobí příliš velké snížení elektrické vodivosti. Produktem reakcí jsou sloučeniny nerozpustné v mědi, často lehčí než měď, které vyplavou na hladinu a lze je odstranit v podobě strusky. [1]

Bór

Bór je možné použít ve formě předslitiny nebo CaB_6 . Vlivem reakce s kyslíkem dochází k vytvoření strusky $2\text{Cu}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$. Dle jistých teorií má bór pohlcovat až o 60% více kyslíku než určuje stechiometrický vzorec B_2O_3 , čili má být velmi účinným. V praxi tyto teorie nefungují, proto lepším a více používaným dezoxidovadlem zůstává lithium. [1]

Lithium

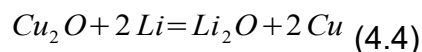
Velkou výhodou lithia je jeho dvojí využití – jako dezoxidovadlo i jako odplynující prostředek na vodík. Zatímco v roztavené mědi je rozpustné, v tuhém stavu nikoliv. Vzhledem k jeho reaktivitě pak vratný materiál lithium téměř neobsahuje. [1]

Pro vysokou reaktivnost je čisté lithium skladováno v oleji, nikoliv na vzduchu. Pro slévárenské potřeby je dodáváno ve formě uzavřených měděných patron, které jsou skladovány na suchých, bezpečných místech. Tyto patrony je nutné před použitím předehřát pro odstranění povrchové vlhkosti, čili alespoň na 105°C . Následně je patrona ponořena ke dnu pečlivě vysušeným nářadím (nejlépe grafitovým) pro nejlepší využití lithia. [1]

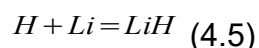
Dle [22] je kromě čistého lithia užíváno také předslitin, například CuLi15 .

Při uvolňování lithia probíhají následující reakce:

a) Dezoxidace



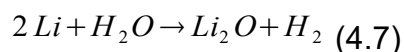
b) Odplynění



c) Rekombinace



d) Reakce během přelévání



Jak oxid lithný, tak hydrid lithia jsou sloučeniny, které velmi ochotně vyplouvají taveninou na hladinu, kde je možné je stáhnout. K rekombinaci c) dle [22] dochází pouze při větším množství kyslíku a vodíku, nicméně vzniklý hydroxid také vyplouvá k hladině. Pokud však zůstává v tavenině, způsobuje po ztuhnutí nižší odolnost proti korozi. [1,22]

Reakce d) probíhá pouze v případě, kdy je užito příliš velké množství lithia, které zůstává nevyužité v tavenině a tedy může způsobit znovunaplynění taveniny vodíkem, což následně vede k tvoření bublin v odlitku. [1]

Dalším nebezpečím spojeným s nadužitím lithia je jeho velká afinita ke kyslíku. Ta způsobí, že lithium rozkládá vzniklé oxidy různých škodlivých prvků (např. FeO, P₂O₅), které se opětovně rozpustí v mědi a způsobí silný pokles vodivosti. [1]

Na druhou stranu může lithium tvořit intermetalické fáze s kovy nesnižujícími elektrickou vodivost (viz kapitola 3.2.2), které pak zlepšují mechanické vlastnosti materiálu a zvyšují jeho elektrickou vodivost.

Dle [1] je možné, pravděpodobně z ekonomického hlediska, užít k dezoxidaci nejprve fosfor a až následně menší množství lithia. Tento proces musí být obezřetně proveden a vzniklé fosforečné oxidy musí být velmi rychle odstraněny z hladiny, aby nedošlo k jejich opětovnému rozložení do taveniny.

Hořčík

Oproti lithiu má hořčík nespornou výhodu ve způsobu uchovávání, neboť je možné jej uchovávat na vzduchu. [1]

Při srovnání volných Gibbsových energií tvorby oxidů lithia a hořčíku vychází najevo, že hořčík je účinnější dezoxidovadlo než lithium. Vzniklé hořečnaté oxidy jsou sice stabilnější než oxidy lithia, avšak mohou vytvářet oxidické pleny, které by pro výsledné mechanické vlastnosti odlitku byly velmi nepříznivé. [1]

4.2.2 EFEKTIVITA DEZOXIDAČNÍCH PROSTŘEDKŮ

Tabulka 4.1 ukazuje, potřebné množství, tedy pomyslnou efektivnost jednotlivých prvků, které se mohou podílet na úpravě roztavené mědi. Volba těchto prvků je samozřejmě odvislá od skutečné účinnosti, dostupnosti, ceny a také požadavků na konečný materiál. [1]

Tab 4.1 Teoretická efektivita dezoxidovadel [1]

| | | Množství potřebné pro navázání 0,01% kyslíku |
|----------------|--|--|
| Dezoxidovadlo | Produkt reakce | g/100 kg |
| Uhlík | CO | 7,5 |
| | CO ₂ | 3,8 |
| Fosfor (čistý) | P ₂ O ₅ | 7,5 |
| | 2Cu ₂ P ₂ O ₅ | 5,6 |
| CuP15 | P ₂ O ₅ | 49,3 |
| | 2Cu ₂ P ₂ O ₅ | 36,8 |
| Bór (čistý) | B ₂ O ₃ | 4,4 |
| CuB2 | B ₂ O ₃ | 224,5 |
| Lithium | Li ₂ O | 8,7 |
| Hořčík | MgO | 15,0 |

4.2.3 STUPŇOVITÁ DEZOXIDACE

Jak již bylo řečeno, fosfor silně snižuje elektrickou vodivost. Tato metoda sice pracuje s fosforem, ale s velmi malým množstvím. Prvním stupněm dezoxidace je totiž zinek. Při teplotě 1200°C se přidá 0,3 až 0,5% do taveniny pro uskutečnění prvního stupně dezoxidace. Následuje druhý stupeň provedený fosforem, kterého je užito pouze 0,05 až 0,07%, který zreaguje s kyslíkem za vzniku tekutého roztoku, lehčího než tavenina, který vypluje na hladinu. Zbytkové množství fosforu by pak nemělo mít praktický vliv na vodivost. [22]

4.2.4 VÁZÁNÍ ZBYTKOVÉHO DEZOXIDOVADLA

Tento postup využívá skutečnosti, že dezoxidovadlo může v tavenině vytvářet nové sloučeniny (být vázáno) se třetím vstupním prvkem nebo tvořit samostatný tuhý roztok. Příkladem takových prvků jsou bór, chróm nebo olovo. Na obr. 22 je vidět, že tyto prvky mají velmi nízkou rozpustnost v mědi, tudíž při větším množství začnou tvořit své vlastní tuhé roztoky, resp. čisté krystaly. [22]

Metody vázání dezoxidovadla na třetí prvek byly popsány dvě, které nesnižují elektrickou vodivost, ačkoliv uvažují s použitím fosforu.

Metoda Hess-Pawlek

K vázání zbytkového fosforu se užívá železo. Ačkoli každý z těchto prvků je samostatně pro vodivost škodlivý. Pokud však poměr prvků je Fe : P = 6 : 1, vzniká v tavenině fosfid železa Fe₂P, který vodivost téměř neovlivňuje. [22]

Metoda Thury

Při této metodě se pracuje s fosforem a vápníkem. Po dezoxidaci fosforem se vápník přidá do taveniny ve formě předslitiny CuCa20 . Tyto dva prvky následně vytvoří sloučeninu Ca_3P_2 , která v tavenině není rozpustná a je jemně vyloučená, takže vodivost také příliš nesnižuje. V praxi se množství fosforu volí s ohledem na očekávané, případně zjištěné množství kyslíku v tavenině. Vápníku je po dezoxidaci přidáno čtyřnásobné množství z přidaného fosforu. [22]

Pomocí experimentů byla tato metoda ověřena s dosaženými výsledky vodivosti až 53 S.m^{-1} (tj. 91% IACS). [22]

4.2.5 OVĚŘENÍ ŘÁDNÉ DEZOXIDACE

Před samotným odléváním je třeba ověřit, zda celkové odplynění proběhlo správně a taky, zda je dostatečné. Pro tento účel existují dva jednoduché testy, které jsou aplikovatelné pro každý průmyslový provoz.

Kontrolní vzorek

Pro tento způsob je odlit testovací odlitek. Toto těleso může mít dle [1] průměr 75mm a výšku také 75mm. Dle pochodů při tuhnutí je následně odplynění vyhodnoceno. Pokud vzniká staženina a propad hladiny, je tavenina dobře odplyněná. V opačném případě dojde k nafouknutí, případně vytvoření až hříbovitého útvaru. [1]

Grafitová tyč

Při tomto testu se do taveniny ponoří dobře vypálená grafitová tyč. Pokud je v tavenině přítomný kyslík, dochází na povrchu tyče ke slučování uhlíku a kyslíku na oxid uhelnatý, což způsobuje vibrace tyče. Zkušený pracovník tak může kvalitativně poznat, zda je odplynění dostatečné, či nikoliv. Touto metodou lze určit přítomnost kyslíku nad 0,01%. [1,20]

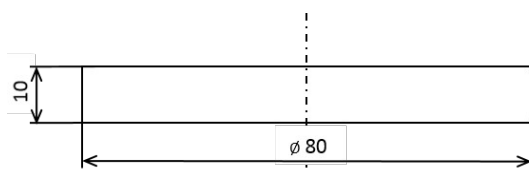
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

5 PŘÍPRAVA A PROVEDENÍ EXPERIMENTU

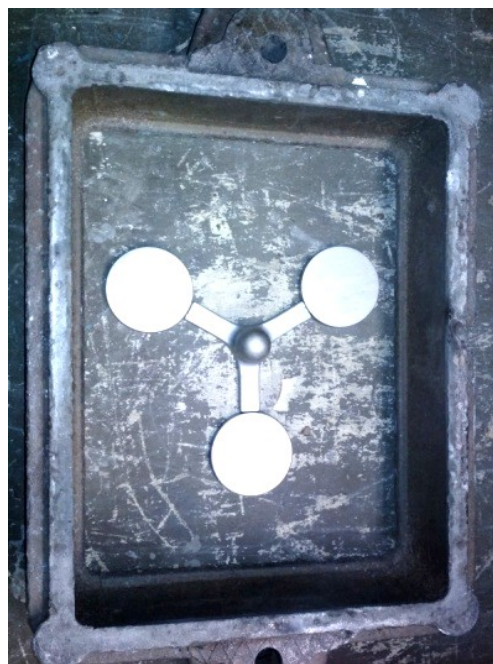
Cílem celé práce bylo ověření vlivu podmínek metalurgického zpracování, použité slévárenské technologie a podmínek tuhnutí na elektrickou vodivost a mechanické vlastnosti odlitků z čisté mědi. Experiment měl určit vliv vakuového zpracování mědi na vnitřní jakost a vlastnosti odlitků. Předpokladem bylo dostatečné odplynění taveniny ve vakuu. Byly provedeny tři tavby - první za normálního (atmosférického) tlaku v elektrické odporové peci a další dvě za sníženého tlaku (ve vakuu) ve vakuové elektrické indukční peci. Rozdíl v tavbách na vakuované peci byl v použití dezoxidace ve třetí tavbě. Celý experiment proběhl ve školní slévárně odboru slévárenství, ÚST, FSI, VUT v Brně.

5.1 VÝROBA FOREM

Pro potřeby tohoto experimentu byl navržen a použit jednoduchý model desky o průměru 80 mm a tloušťce 10 mm (obr. 47). V každé formě byly symetricky umístěny tři tyto modely po 120° na společném vtokovém kůlu dle obr. 48. Jeden odlitek byl opatřen ocelovým chladítkem o stejném průměru jako průměr modelu a tloušťce 5 mm, druhý odlitek byl izolován sibalovou rohoží o rozměrech 100x100x4 mm a třetí byl ponechán přirozeně v písku. Jak chladítko, tak izolace byly umístěny v horní polovině formy (ve vršku).



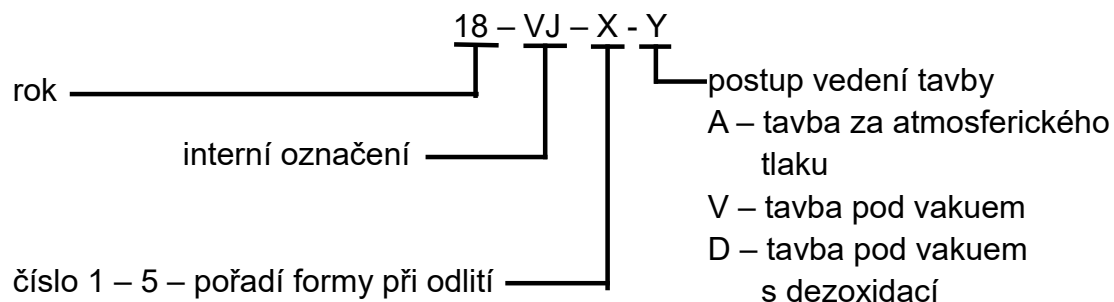
Obr. 47 Výkres experimentálního modelu



Obr. 48 Rozložení modelu ve formovacím rámu

Pro výrobu forem byla použita formovací směs s alkalicko-fenolickým pojivovým systémem. Ostřivem byl křemenný písek se zrnitostí $d_{50}=0,31\text{mm}$, pojivem alkalicko-fenolová pryskyřice PERMABIND PB 408 CZ s tvrdidlem PERMABIND PLUS 6. Tato směs byla zpracována na průběžném mísiči. Formování proběhlo ručně do kovových rámců. Každá forma byla opatřena zirkonovým nátěrem.

Formy v rámci všech experimentálních taveb byly označeny následujícím způsobem:



Tabulka 5.1 zobrazuje množství vyrobených forem a odlitků

Tabulka 5.1 Seznam odlitých forem a odlitků

| | Počet odlitých forem | Počet odlitků k pozorování |
|-------------|----------------------|----------------------------|
| První tavba | 5 | 15 |
| Druhá tavba | 5 | 15 |
| Třetí tavba | 2 | 6 |

Třetina odlitků z každé tavby uvedená v tab. 5.1 byla odlita s chladítkem, třetina s odlitkem opatřeným izolací a třetina pouze do formovací směsi.

5.2 PRVNÍ TAVBA

První tavba byla provedena na elektrické odporové peci LAC (obr. 49). Tavení probíhalo v jílografitovém kelímku od spol. MORGAN. Pro tuto tavbu byl zvolen redukční postup tavení.



Obr. 49 Odporová pec LAC

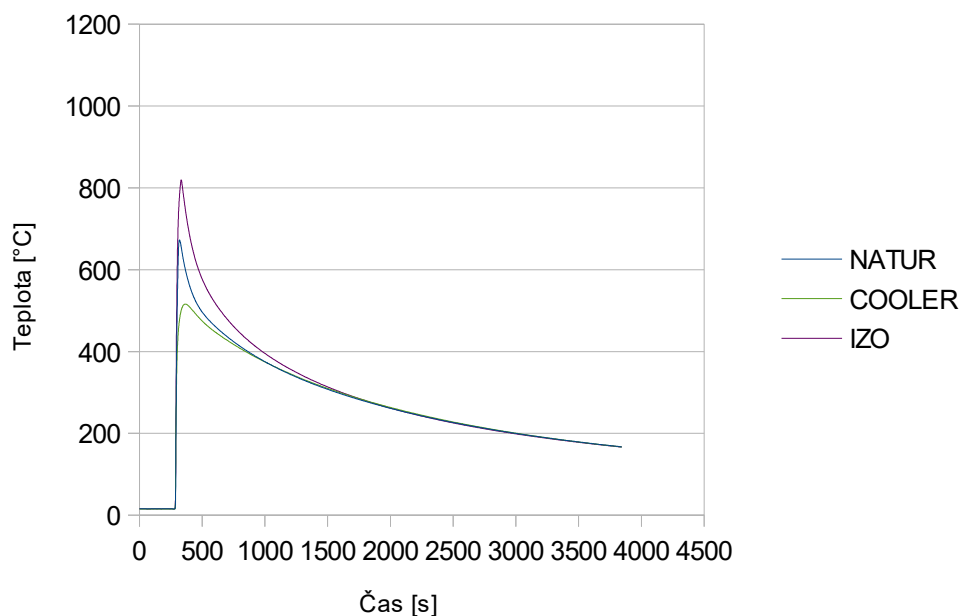
Do vyčištěného kelímku byla vložena vsázka, sestávající z odstřižených měděných plechů o celkové hmotnosti 15 kg. Vsázka byla prokládána dřevěným

uhlím a následně jím i zakryta. Teplota na peci byla nastavena 1190°C. Při jiné tavbě vedené ve stejné peci za srovnatelných podmínek byl naměřen rozdíl mezi teplotou taveniny a teplotou nastavení pece 20 °C. Teplota kovu v tavbě 1 po vyjmutí kelímku z pece činila, s uvažováním popsaneho rozdílu, přibližně 1170°C.

Ihned po vyjmutí kelímku následovalo odlití pěti forem. V první formě byly umístěny plášťové termočlánky typu K (NiCr-NiAl) o průměru 1 mm. Termočlánky byly umístěné v keramické trubičce v ose odlitku v cca polovině tloušťky stěny odlitku. Měření teploty kovu ve formě bylo provedeno od odlití až po ochlazení odlitků na cca 200 °C.

Záznam měření je uveden na obr. 50. V grafu je na ose x vynášen čas v sekundách, na ose y teplota ve stupních Celsia. Vzhledem k teplotě tavení čisté mědi 1084°C nebyl zachycen průběh tuhnutí. Tři křivky v grafu na obr. 50 představují naměřené teploty v odlitku s izolací - křivka IZO, v odlitku s chladítkem - křivka COOLER a v odlitku pouze ve formovací směsi - křivka NATUR. Stejný způsob značení je použit i u grafů křivek chladnutí tavby 2 a 3.

Nejvyšší naměřená hodnota byla naměřena v izolovaném odlitku a její hodnota činila 820°C. Vzhledem k malé velikosti odlitků a jejich rychlému ztuhnutí nebyla dosažena licí teplota. Teplota tavení čisté mědi je cca 1084 °C a během měření bylo zachyceno chladnutí a nikoliv tuhnutí (obr. 50). Naměřené křivky jasně zachytily předpokládaný rozdíl v rychlosti chladnutí jednotlivých odlitků ve formě v závislosti na použití chladítka, resp. tepelné izolace.



Obr. 50 Křivky chladnutí v odlitcích první tavby

Chemické složení tavby bylo určeno optickým emisním spektrometrem Q4 Tasman. Výsledky analýzy chemického složení jsou uvedeny v tab. 5.2.

Tabulka 5.2 Chemické složení první tavby

| Prvek | Zn | Pb | Fe | Co | Al | Bi | Ni | P | Cu |
|--------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Množství [%] | 0,0054 | 0,014 | <0,005 | 0,0035 | 0,0055 | 0,0063 | 0,0098 | 0,0034 | 99,88 |

Z tab. 5.2 vyplývá, že se jedná o měď s čistotou přibližně 99,9%. Obsah ostatních prvků je povětšinou nižší než 0,02%. Obsah nežádoucích prvků (dle obr. 22) je velmi nízký. Zjištěná množství by neměla nijak významně ovlivnit elektrickou vodivost odlévaných odlitků.

5.3 DRUHÁ TAVBA

Druhá tavba měla ověřit vliv odplynění taveniny mědi ve vakuu na vnitřní jakost (bubliny, řediny) a tím i na elektrické vlastnosti odlitků z elektrovodné mědi. Tavba byla provedena na indukční peci CONSARC (obr. 51) s neutrální vyzdívkou. V peci byla před tavbou provedena tzv. výplachová tavba, která měla odstranit kovové nečistoty a strusku z vyzdívky.

Pro druhou tavbu byla použita stejná vsázka čisté mědi jako při první tavbě. Hmotnost tavby byla 30 kg. Nejprve proběhl přehřev vsázky v peci nízkým příkonem pro odstranění vlhkosti a mastnot ze vsázky. Po přehřevu bylo na pec umístěno víko pece a bylo zahájeno tavení. Během tavení se udržoval tlak v peci mezi 10 000 a 20 000 Pa. Po roztavení byla tavenina vakuována po dobu 20 minut. Na konci zpracování bylo dosaženo minimálního tlaku v peci nad taveninou 11 Pa. V průběhu vakuování byl do taveniny přes porézní tvárnici ve dně pece dmýchán argon. Průchod argonu taveninou byl pozorován průzorem ve víku pece, kde bylo možné vidět na hladině taveniny uvolňování bublin.



Obr. 51 Vakuová indukční pec CONSARC

Ponorným termočlánkem byla před odpichem naměřena teplota kovu v peci 1247°C. Odpich byl proveden do předeřátého jílografitového kelímku. Teplota lití byla změřena v pánvi po odpichu a činila 1167°C.

Pro tavbu byla použita stejná vsázka jako u první tavby. Pomocí emisního spektrometru bylo zjištěno složení druhé tavby, které je uvedeno v tabulce 5.3. Chemické složení druhé tavby je identické s první tavbou a měřená elektrická vodivosti by tedy neměla být ovlivněna chemickým složením.

Tabulka 5.3 Chemické složení druhé tavby

| Prvek | Zn | Pb | Fe | Co | Al | Bi | Ni | P | Cu |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Množství [%] | 0,0011 | 0,0074 | <0,005 | 0,0022 | 0,0055 | 0,0040 | 0,0076 | 0,0033 | 99,89 |

Po odlití začaly hladiny jednotlivých vtokových jamek prskat a došlo k jejich vydutí (obr. 52 a 54). Po ochlazení byly odlitky vyjmuty z formy a vtokové soustavy byly rozřezány. Snímky vtokových kúlů po rozříznutí jsou uvedeny na obr. 53 a 55. Z řezů je patrné, že vtokové soustavy a patrně i odlitky budou postiženy bublinami.



Obr. 52 Vydutí vtokové jamky první formy s termočlánky



Obr. 53 Rozřezaná vtoková jamka první formy

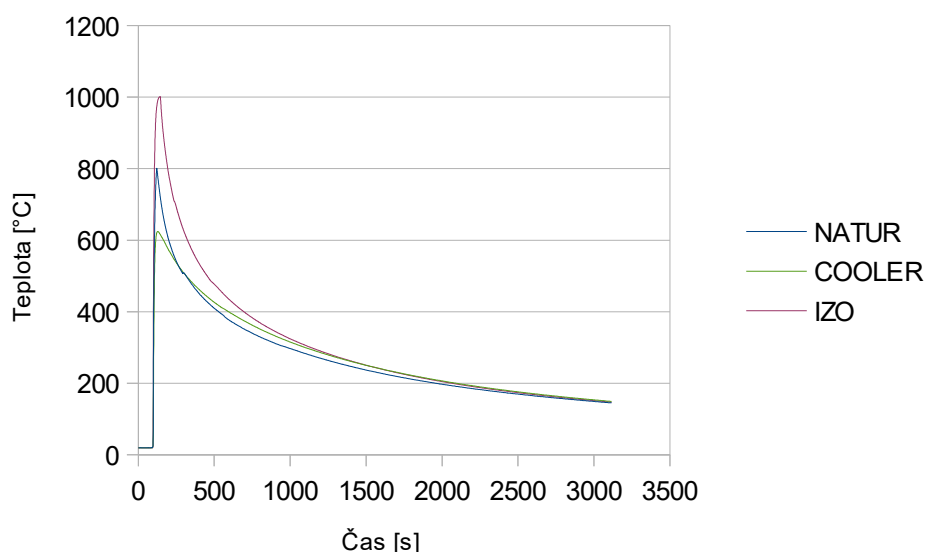


Obr. 54 Vydutí vtokové jamky čtvrté formy



Obr. 55 Rozřezaná vtoková jamka čtvrté formy

Tak jako u první tavy, bylo i zde provedeno měření teploty v odlitcích. Použity byly opět plášťové termočlánky typu K. Bohužel ani v tomto případě nebyla teplota tuhnutí naměřena. Nejvyšší naměřená teplota byla 1001°C (obr. 56). Naměřené křivky chladnutí opět zobrazují rozdíl mezi podmínkami chlazení odlitků.



Obr. 56 Křivky chladnutí druhé tavy

5.4. TŘETÍ TAVBA

Pro třetí tavbu byla opět použita indukční pec CONSARC jako při druhé tavně. Před tavením byla opět provedena výplachová tavba. Vsázku třetí tavy tvořil vratný materiál o hmotnosti 28 kg (vratný materiál z předchozích taveb) a 3 kg nové vsázky v podobě měděných odstřížků.

Tavba proběhla stejným způsobem jako druhá tavba. Nejprve byla vsázka předeřhřáta k odstranění vlhkosti a mastnoty ze vsázky. Po nasazení víka pece byl pracovní prostor pod víkem vakuován. Během tavení byl udržován tlak v rozmezí 10 000 až 20 000 Pa. Po roztavení bylo provedeno vakuování v délce 20 minut. Při vakuování bylo dosaženo minimálního tlaku nad hladinou taveniny cca 50 Pa.

Po sundání víka byl do sibalové pánvičky odebrán vzorek kovu, který byl odlit do otevřené pískové formy. Odlitý vzorek byl stejného průměru, jako experimentální odlitky (80 mm) pouze o rozdílné tloušťce 20 mm. Vzorek byl bezprostředně po odlití vhozen do vody. Tento postup měl zabránit difuzi a změně koncentrace kyslíku ve vzorku při tuhnutí. Tento vzorek byl označen písmenem V.

Ponorným termočlánkem byla změřena teplota v peci před odpichem 1204°C. Odpich byl proveden do předeřhřátého jílografitového kelímku. Během odpichu byl do taveniny přidán zinek k dezoxidaci. Hmotnost zinku činila 53 g, čili 0,171% vsázky. Následoval intenzivní var taveniny. Pro uklidnění varu byl k dezoxidaci použit ještě

hliníkový drát. Po odeznění varu byly odlity dvě formy zkušebních odlitků a dále ještě jeden testovací vzorek, stejný jako vzorek vhozený do vody. Vzorek byl označen písmenem D.

Třetí tavba po prvotní vizuální kontrole vtokových jamek vedla k požadovanému účelu. Jak je zřejmé z rozříznuté vtokové jamky druhé formy třetí tavby a druhého testovacího penízku, nedošlo k masivnímu vydutí hladiny, což ukazovalo na nižší obsah plynů v tavenině (obr. 57 až obr. 60).



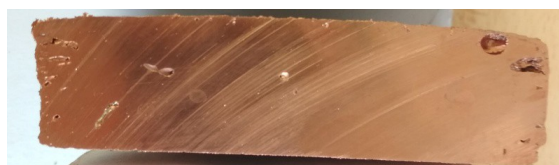
Obr. 57 Vtoková jamka po dezoxidaci taveniny



Obr. 58 Rozřízlá vtoková jamka druhé formy

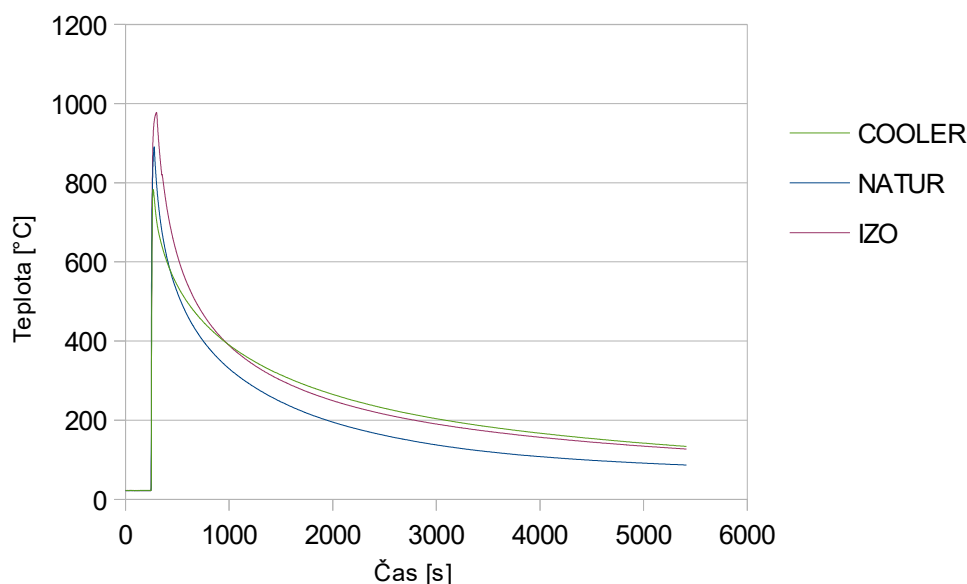


Obr. 59 Testovací vzorek D bez vydutí



Obr. 60 Rozřízlý testovací vzorek D

Také u třetí tavby byly měřeny teploty kovu ve formě po odlití. K měření byly použity opět plášťové termočlánky typu K umístěné v křemenné trubičce. Ani u třetí tavby se nepodařilo naměřit průběh tuhnutí odlitku. Výsledky měření teplot v odlitcích třetí tavby jsou uvedeny v obr. 61.



Obr. 61 Křivky chladnutí třetí tavby

Pomocí emisního spektrometru bylo zjištěno složení třetí tavby, které je uvedeno v tabulce 5.4. Při porovnání chemického složení s předešlými tavbami došlo pouze ke změnám koncentrace zinku a hliníku. Obsah zinku vzrostl přibližně desetinásobně, ale i po jeho zvýšení je obsah Zn nižší než 0,015 %. V případě koncentrace hliníku je nárůst zcela minimální. Nízké koncentrace hliníku i zinku po dezoxidaci souvisí s vypařováním zinku při dezoxidaci a stažením hliníku ve strusce po dezoxidaci. Chemického složení třetí tavby je srovnatelné se složením první a druhé tavby.

Tabulka 5.4 Chemické složení třetí tavby

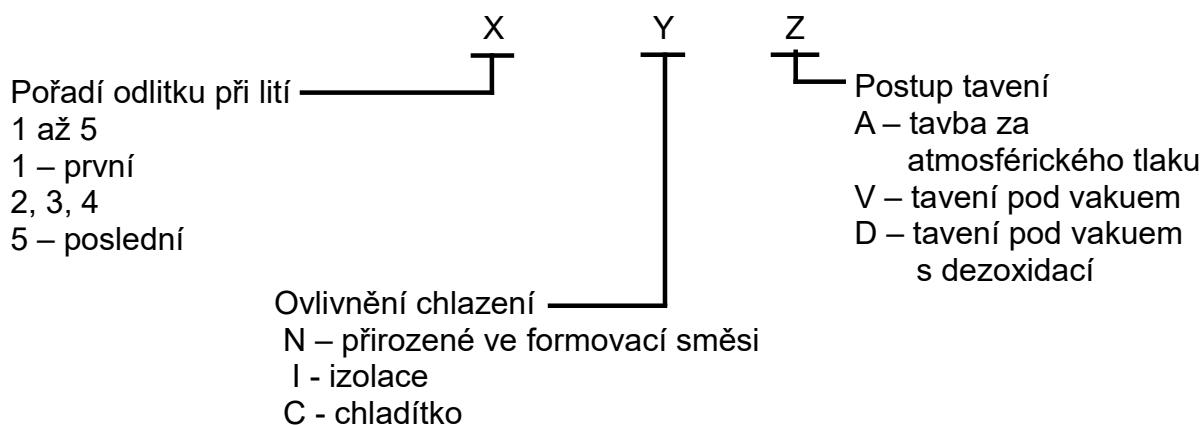
| Prvek | Zn | Pb | Fe | Co | Al | Bi | Ni | P | Cu |
|--------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Množství [%] | 0,014 | 0,0051 | <0,005 | <0,002 | <0,005 | 0,0030 | 0,0071 | 0,0033 | 99,89 |

Z množství přisazeného zinku a rozdílu koncentrace zinku v tavbě 3 a tavbě 2 (složení vsázky) lze určit, že využití zinku je cca 7,5 % z přisazeného množství. Více než 92 % zinku se vypařilo nebo bylo využito na vlastní dezoxidaci.

6 VYHODNOCENÍ

Pro hodnocení experimentu bylo využito kombinace několika zkušebních metod. Nejprve byla provedena analýza bublin v odlitcích, následně byla provedena metalografická analýza a hodnocení elektrické vodivosti. Celý experiment a dosažené výsledky z hlediska elektrické vodivosti byly zhodnoceny na základě statistické analýzy.

Odlité vzorky byly značeny následovně:



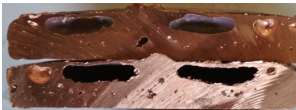





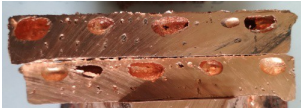
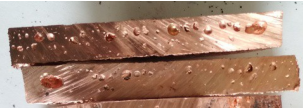
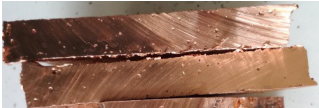
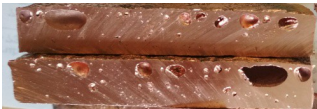





6.1 VYHODNOCENÍ VÝVINU PLYNŮ

Všechny odlitky byly nejprve odděleny od vtokové soustavy a následně rozřezány na laboratorní pile na dvě poloviny. V tabulce 6.1 jsou uvedeny snímky jednotlivých rozřezaných odlitků z tavby 1. V rámci experimentu bylo provedeno kvalitativní hodnocení objemu dutin v rozříznutých odlitcích.

Jak vyplývá z tab. 6.1, jsou všechny odlitky postiženy bublinami a dutinami. Odlitky nebyly nálitkovány a tedy objem dutin v odlitcích je dán součtem objemu staženin a dutin. Kvalitativním hodnocením bublin odlitků z první tavby lze konstatovat následující závěry:

- Všechny odlitky bez ohledu na režim ochlazování i pořadí odlévání obsahují dutiny a bubliny.
- První odlévaný odlitek u každého režimu ochlazování měl subjektivně stejnou plochu vad jako poslední odlitý odlitek. Jinak řečeno pořadí odlévání nemělo vliv na objem dutin v daném odlitku. Měnila se jen velikost jednotlivých dutin a jejich rozložení.
- Použití izolace vedlo k posunu tepelné osy k vršku formy (k izolaci). To vedlo k tomu, že v horní polovině odlitku se nachází velké soustředěné bubliny. Objem dutin v izolovaném vzorku byl větší než ve vzorcích s chladítko nebo neovlivněných – ve formovací směsi.
- Nejnižší objem dutin vykazovaly podle očekávání odlitky ochlazované pomocí chladítek. V odlitcích se vyskytovaly pouze drobné póry, které budou mít i spojitost s vlastním tuhnutím.

Tabulka 6.1 Snímky všech odlitků první tavby

| Typ ovlivnění/ číslo formy | Izolace | Přirozená forma | Chladítko |
|----------------------------------|---|--|---|
| 1 |  |  |  |
| 2 |  |  |  |
| 3 |  |  |  |
| 4 |  |  |  |
| 5 |  |  |  |

Stejným způsobem byly rozřezány i odlitky z druhé tavby provedené na vakuové peci. I přes použití vakuového zpracování byly zjištěny přibližně stejné objemy dutin jak ve vtokových jamkách, tak ve vlastních odlitcích. Rozdíly mezi odlitky první a druhé tavby byly minimální. Použití vakuového zpracování nevedlo k snížení naplynění taveniny a vzniku bublin při tuhnutí.

V tab. 6.2 jsou vloženy snímky rozřezaných odlitků ze třetí tavby, kde kromě použití vakua byla tavenina dezoxidována kombinací Zn a Al. Jak vyplývá z obrázků v tab. 6.2, nachází se i v tavbě 3 v odlitcích dutiny, ale je jich významně méně. Nejméně bublin bylo zjištěno u odlitků s chladítkem. Tyto odlitky obsahují množství drobných dutinek rozmístěných po celém průřezu odlitku. Dutiny mají již více charakter staženin a ukazují, že dezoxidace taveniny měla zásadní vliv na snížení výskytu bublin.

Tabulka 6.2 Snímky odlitků ze třetí tavby

| Typ ovlivnění/ číslo formy | Izolace | Přirozená forma | Chladítko |
|----------------------------------|---|--|---|
| 1 |  |  |  |
| 2 |  |  |  |

Izolované vzorky obsahují několik velkých bublin, zpravidla na vršku odlitku (blíže k izolaci). Pouze ve formovací směsi chladnoucí vzorek má bubliny podobné bublinám v odlitku izolovaném. Tyto bubliny jsou menší a rozprostřené po celém průřezu.

U druhé a třetí tavby byly z odlitků odebrány vzorky pro spalovací analyzátor pro zjištění obsahu kyslíku v odlitku. Z druhé tavby byl zvolen vzorek 1CV, ze třetí tavby vzorky V a D (V vzorek ochlazený ve vodě, D vzorek po dezoxidaci). Výsledky analýzy jsou uvedeny v tabulce 6.3.

Tabulka 6.3 Množství kyslíku zjištěné na spalovacím analyzátoru

| Vzorek | Koncentrace kyslíku ve vzorcích [hmot. %] | | |
|--------|---|--------|--------|
| 1CV | 0,0322 | 0,0241 | 0,0179 |
| V | 0,0266 | 0,0267 | 0,0271 |
| D | 0,0364 | 0,0333 | 0,0313 |

Jak vyplývá z hodnot koncentrací kyslíku v tab. 6.3, byl v první tavně stanoven obsah kyslíku v rozmezí cca 180 až 320 ppm. V tavně dvě cca 270 ppm a cca 330 až 360 ppm v tavně 3. Rozpustnost kyslíku dle diagramu na obr. 40 je při teplotě 1066 °C 0,03% a při pokojové teplotě pouze cca 5 ppm. Ve struktuře všech tří taveb lze tedy očekávat výskyt eutektika Cu-Cu₂O.

V případě tavby 1 a 2 docházelo při tuhnutí vtokové jamky po ztuhnutí povrchové vrstvy k varu ve zbylé tavenině, odlétávání jisker a postupnému vyduť hladiny kovu v důsledku přesycení zbylé taveniny o plyny. Vodík by neměl mít po vakuovém zpracování v tavenině nijak významný obsah. Eliminace dutin po dezoxidaci naznačuje, že bubliny v odlitcích druhé a třetí tavby mohou souviset s kyslíkem rozpuštěným v tavenině.

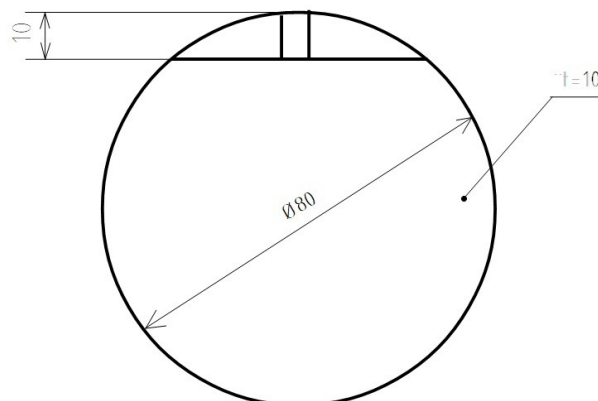
6.2 VYHODNOCENÍ MIKROSTRUKTUR ODLITKŮ

Pro hodnocení struktury byly vybrány vzorky ze dvou odlitků z každé tavby. Hodnoceny byly vždy první a poslední odlitek z tavby. U každého odlitku byly hodnoceny vzorky z odlitku ve formovací směsi, izolovaného a odlitku s chladítkem. Metalografické vzorky byly následně pozorovány na světelném mikroskopu při zvětšení 100, 200 a 400. Cílem bylo zhodnotit strukturu materiálu a velikost zrna.

6.2.1 PŘÍPRAVA METALOGRAFIE

Jak bylo výše uvedeno pro metalografické výbrusy byl vždy brán vzorek z první a poslední odlité formy (tzn. 1 a 5 u 1. a 2. tavby, resp. 1 a 2 u třetí tavby). Z každé formy byly zhotoveny vždy tři vzorky – chlazený, izolovaný a z formovací směsi (bez ovlivnění tuhnutí). Metalografický vzorek byl vyříznut z každého odlitku

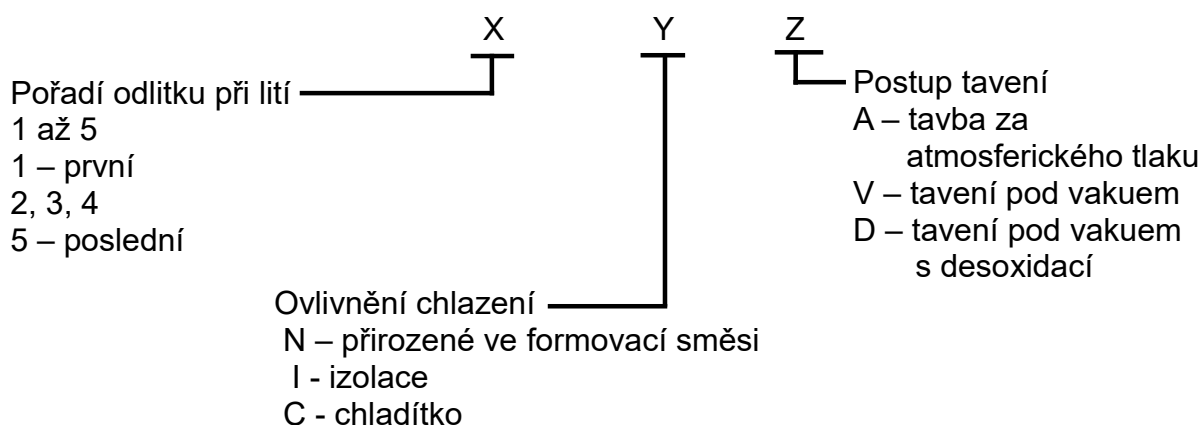
na kotoučové pile Struers Labotom 3 podle schématu obr. 62. Nejprve byla odříznuta kruhová úseč. Z ní byl následně vyřezán metalografický vzorek dle schématu na obr. 62. Rozměry metalografických vzorků měly plochu cca 10 x 10 mm.



Obr. 62 Schéma odběru metalografického vzorku

Po vyřezání byly metalografické vzorky zalisovány do dentacrylu, který umožňuje snadné broušení a leštění vzorků.

Po zalisování byl každý vzorek označen stejně, jako vzorek, ze kterého byl vyříznut (tzn. např. 1IA atd.)



Kromě těchto vzorků byly také zalisovány výbrusy vzorků V a D, které byly odlity při třetí tavbě.

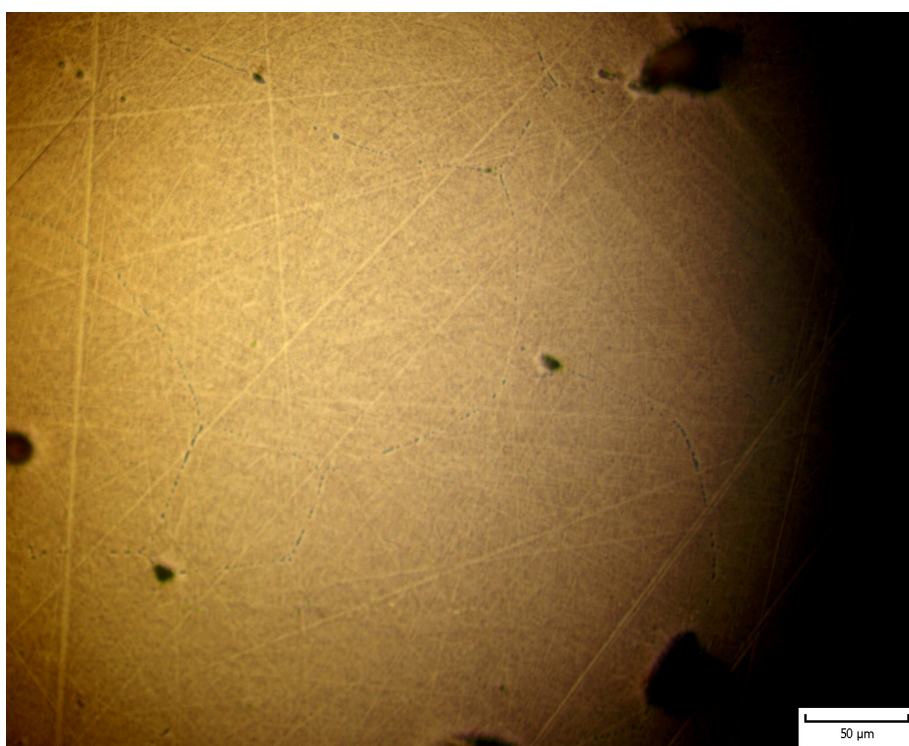
Leštění metalografických výbrusů proběhlo na poloautomatickém leštícím přístroji Struers Labopol-5. Brousilo se na kotoučích zrnitosti 220, 800 a 1200. Leštění bylo provedeno postupně pomocí emulze s drsností 9, 3 a 1 μm .

6.2.2 MIKROSTRUKTURY VZORKŮ

Jak bylo výše uvedeno, byly hodnoceny vždy dvě formy z každé tavby (6 forem), přičemž v každé formě byly hodnoceny 3 odlitky. Tzn., celkově bylo hodnoceno 18 metalografických vzorků. Pro přehlednost je v diplomové práci uvedeno pouze hodnocení vzorků z přirozeného, izolovaného a chlazeného odlitku tavby 1. Z tavby 2 a z tavby 3 je pak uvedeno hodnocení jen pro vzorky z odlitků s chladítky.

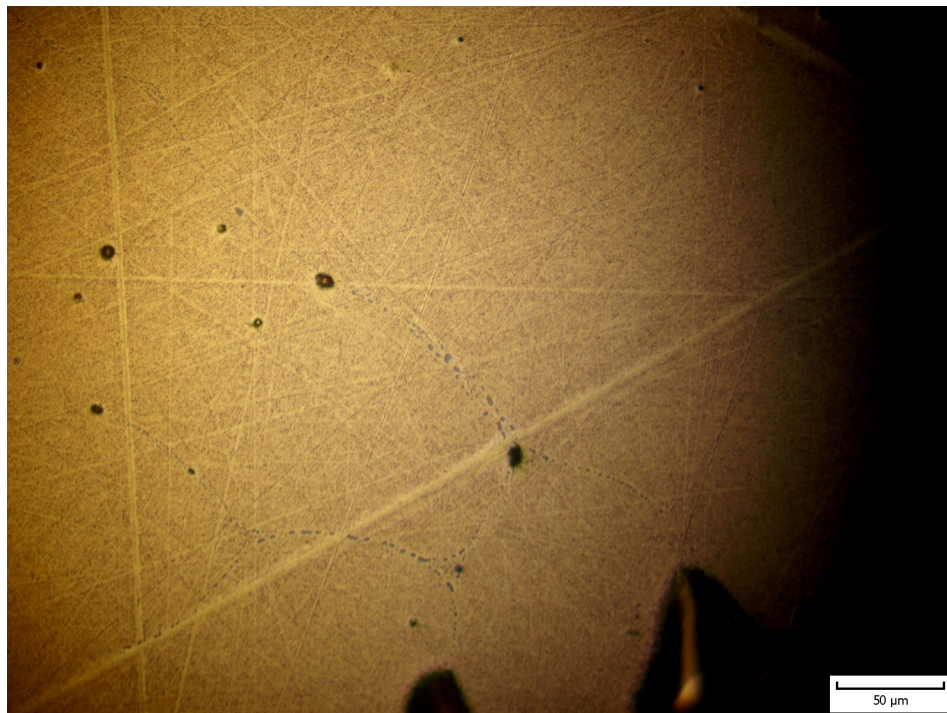
První tavba

Na obr. 63 je uveden snímek struktury vzorku první tavby ztuhlý ve formovací směsi. Struktura vzorku je jednofázová (čistá měď). Ve struktuře se nachází dutiny – bubliny drobné a v některých případech i o velikosti větší než 50 μm . Ve vzorku je možné identifikovat hranice zrn, na kterých je vyloučeno ve formě sítoví (nesouvislého) eutektikum $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$. Vyloučené eutektikum umožňuje zvýraznit hranice zrn a usnadnit tak měření velikosti zrn. Velikost zrn se pohybuje nejčastěji v rozmezí 150 – 200 μm x 150 -200 μm .



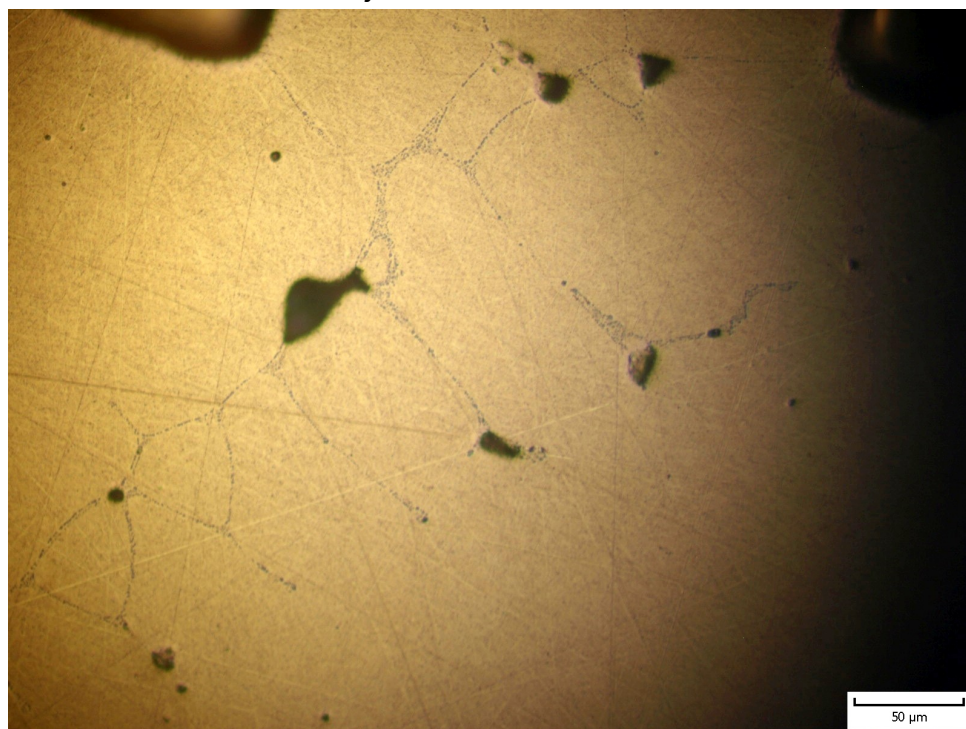
Obr. 63 Vzorek 5NA (zvětšeno 400x)

Na obr. 64 je uveden snímek struktury vzorku izolovaného odlitku z první tavby. Struktura vzorku je jednofázová (čistá měď). Ve struktuře se nachází drobné dutiny do 9 μm a dále bubliny o velikosti větší než 70 μm . Ve vzorku je opět možné částečně identifikovat hranice zrn, na kterých je vyloučeno ve formě sítoví (nesouvislého) eutektikum $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$. Velikost zrn se pohybuje nejčastěji okolo 150 μm x 150 μm . Velikost zrna je srovnatelná se vzorkem tuhnoucím jen ve formovací směsi.



Obr. 64 Vzorek 1IA (zvětšeno 400x)

Na obr. 65 je uveden snímek struktury vzorku první tavby odlitku s chladítkem. Struktura vzorku je tvořena tuhým roztokem s eutektikem Cu-Cu₂O vyloučeným ve formě téměř souvislého síťoví. Množství eutektika je vyšší, než v předchozích dvou popsanych vzorcích. Ve struktuře se opět nachází drobné dutiny do 5 μm a dále bubliny o velikosti do 50 μm. Velikost zrn je výrazně menší a pohybuje se nejčastěji v rozmezí 30 – 100 μm. Struktura, resp. velikost zrna je srovnatelná se vzorek tuhnoucím jen ve formovací směsi.



Obr. 65 Vzorek 1CA (zvětšeno 400x)

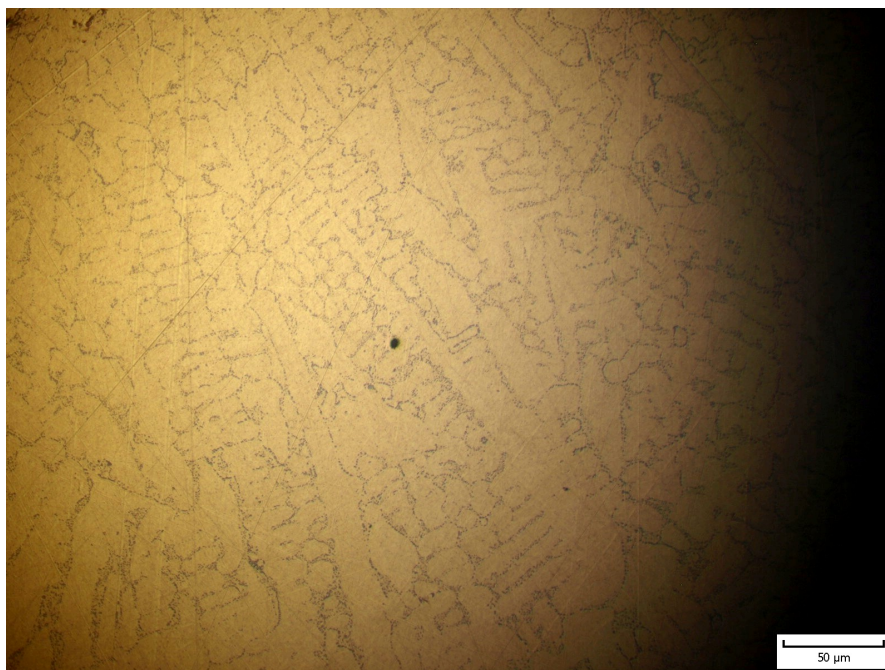
Zhodnocení:

Struktura vzorků je tvořena tuhým roztokem, s místně vyloučeným eutektikem Cu-Cu₂O. Eutektikum je vyloučeno na hranicích zrn, kde tvoří nesouvislé síťové. U odlitku s chladítkem tvoří již téměř souvislé síťové eutektika na hranicích zrn. Lze sledovat, že u odlitku s chladítkem je struktura jednoznačně jemnozrnnější, než u odlitku izolovaného a odlitku pouze ve formovací směsi.

Níže jsou uvedeny pouze vzorky z odlitků tavby 2 a 3 s chladítky. To vychází i z faktu, že měření odporu bylo provedeno pouze u vzorků z odlitků s chladítky.

Druhá tavba

Na obr. 66 je uveden snímek struktury vzorku druhé tavby odlitku s chladítkem. Struktura vzorku je tvořena tuhým roztokem s jasně zřetelnou dendritickou strukturou. V mezidendritických prostorách je vyloučeno souvislé síťové eutektika Cu-Cu₂O. Množství eutektika je zřetelně vyšší, než u tavby 1. To pravděpodobně souvisí i s vyšší koncentrací kyslíku stanovenou ve vzorku 1CV tavby 2 (tab. 6.3). Ve vzorku se nachází pouze 1 drobná dutina o velikosti do 5 μm. Struktura vzorku je oproti vzorkům tavby 1 výrazně jemnozrnnější.

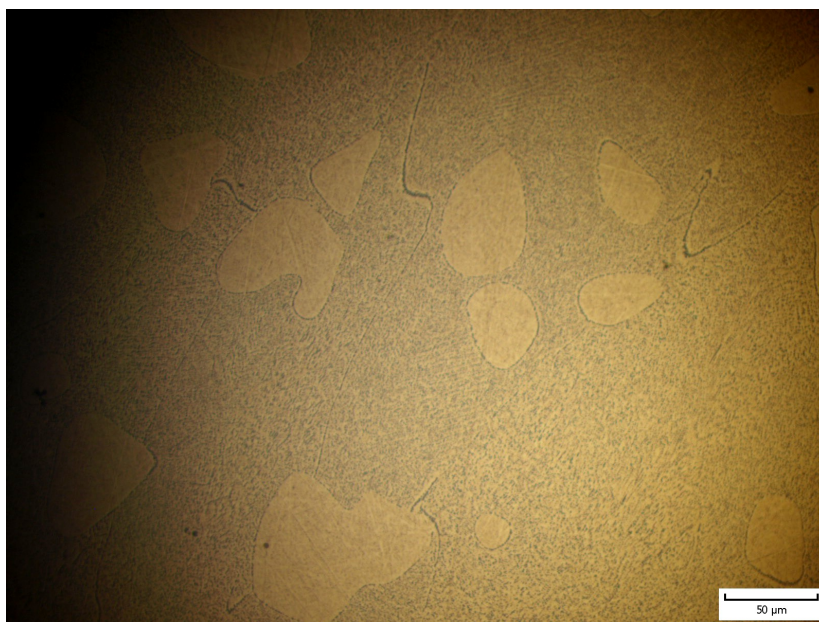


Obr. 66 Vzorek 5CV (zvětšeno 400x)

Třetí tavba

Na obr. 67 je uveden snímek struktury vzorku třetí tavby odlitku s chladítkem. Struktura vzorku je tvořena zrny tuhého roztoku a velkým podílem modifikovaného eutektika Cu-Cu₂O. Množství eutektika je nejvyšší ze všech výše popsanych vzorků.

To souvisí i s nejvyšší koncentrací kyslíku stanovenou ve vzorku D tavby 3 (tab. 6.3). Ve vzorku se nenacházely žádné dutiny (bubliny, řediny). Struktura vzorku je modifikovaná a nelze z uvedeného snímku hodnotit velikost zrna.



Obr. 67 Vzorek 2CD (zvětšeno 400x)

Zhodnocení:

Struktura vzorků z odlitků s chladítky byla jemnozrnější, než u vzorků z odlitku izolovaného nebo tuhnoucího ve formovací směsi. S rostoucí koncentrací kyslíku (tab. 6.3) narůstá ve struktuře podíl eutektika. Ve vzorcích s nízkým podílem eutektika je eutektikum vyloučeno jako nesouvislé nebo souvislé síťové na hranicích zrn.

6.3 HODNOCENÍ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI

Cílem hodnocení bylo stanovit elektrickou vodivost odlitků. Pro měření elektrické vodivosti byly zvoleny dvě metody. První metoda využívala přístroj Sigmatest. Měření nevyžaduje zvláštní přípravu vzorků a bylo proto provedeno u všech odlitých odlitků, i včetně odlitků silně postižených bublinami. Druhá metoda byla založena na měření elektrického odporu (rezistivity) při průchodu proudu vzorkem pomocí velmi přesného mikroohmmetru Cropico. Na základě výsledků kapitoly 6.1 bylo rozhodnuto, že ze silně bublinatých odlitků není vhodné odebírat vzorky. Měření mikroohmmetrem bylo provedeno pouze u vzorků z odlitků opatřených chladítkem.

6.3.1 MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI

Měření elektrické vodivosti Sigmatestem

Jedná se o metodu založenou na měření metodou vířivých proudů, která měří vodivost pomocí komplexní impedance měřící sondy. Měření bylo provedeno

externě slévárnou a modelárnou Nové Ransko. Použit byl přístroj Sigmatest 2.069 od firmy Foerster (obr. 68). Pro práci s tímto přístrojem je srovnávána vodivost vzorku se zvoleným standardem. Před měřením je nutné přístroj seřídít dle dostupných standardů. Běžnými standardy jsou vzorky s vodivostí 4% IACS a 100% IACS. [35]



Obr. 68 Přístroj Sigmatest 2.069 s hodnotou vzorku 2D

Měření bylo provedeno přímo na odlitcích, resp. polovině odlitků. Jak bylo popsáno v kapitole 6.1 byly odlitky ze všech taveb rozřezány na dvě poloviny, aby bylo možné hodnotit bubliny v odlitcích. Na jedné z polovin bylo provedeno měření elektrické vodivosti. Vodivost čisté elektrovodné mědi je 58 MS.m^{-1} (megaSiemens/metr). Hodnoty elektrické vodivosti naměřené Sigmatestem jsou pro odlitky tavby 1 a tavby 2 uvedeny v tab. 6.4 a hodnoty elektrické vodivosti u odlitků ze třetí tavby jsou uvedeny v tab. 6.5.

Při prvotním měření bylo zjištěno, že vzorky vykazují v důsledku dutin ve vršku odlitku výrazně odlišnou elektrickou vodivost ve vršku a ve spodku vzorku. U každého vzorku bylo proto měření provedeno 3x ve vršku a 2x ve spodku. Z nich byly následně stanoveny střední hodnoty elektrické vodivosti ve spodku a vršku odlitku. U třetí tavby byla elektrická vodivost ve vršku a ve spodku stanovena jako aritmetický průměr z 5 nezávislých měření.

Tabulka 6.4 Hodnoty vodivosti naměřené přístrojem Sigmatest 2.069 první a druhé tavby

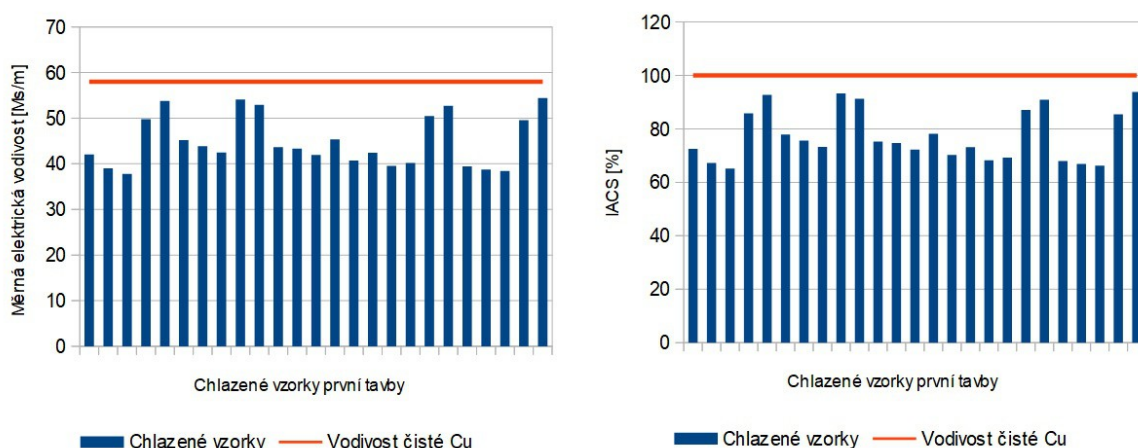
| údaje v MS.m ⁻¹ | IIA | IIV | INA | INV | ICA | ICV |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 43,43 | 40,72 | 38,57 | 38,25 | 42,07 | 35,76 |
| 2 | 47,01 | 40,92 | 43,17 | 36,52 | 38,98 | 33,31 |
| 3 | 43,45 | 38,65 | 41,58 | 33,81 | 37,78 | 34,01 |
| průměr vršek | 44,63 | 40,10 | 41,11 | 36,19 | 39,61 | 34,36 |
| 4 | 54,35 | 40,33 | 41,72 | 33,66 | 49,77 | 35,32 |
| 5 | 54,31 | 41,85 | 43,08 | 33,46 | 53,78 | 46,88 |
| průměr spodek | 54,33 | 41,09 | 42,40 | 33,56 | 51,78 | 41,10 |
| průměr 5 měření | 48,51 | 40,65 | 41,76 | 35,12 | 44,88 | 38,21 |
| údaje v Msm ⁻¹ | 2IA | 2IV | 2NA | 2NV | 2CA | 2CV |
| 6 | 51,76 | 45,08 | 37,03 | 39,57 | 45,20 | 33,65 |
| 7 | 47,05 | 43,72 | 44,22 | 39,73 | 43,83 | 29,93 |
| 8 | 40,51 | 40,75 | 45,38 | 41,09 | 42,47 | 27,43 |
| průměr vršek | 46,44 | 43,18 | 42,21 | 40,13 | 43,83 | 30,34 |
| 9 | 52,28 | 43,31 | 44,31 | 39,92 | 54,09 | 39,23 |
| 10 | 51,35 | 43,58 | 42,03 | 38,95 | 52,91 | 45,10 |
| průměr spodek | 51,82 | 43,45 | 43,17 | 39,44 | 53,50 | 42,17 |
| průměr 5 měření | 48,50 | 43,32 | 42,37 | 39,76 | 47,58 | 35,66 |
| údaje v MSm ⁻¹ | 3IA | 3IV | 3NA | 3NV | 3CA | 3CV |
| 11 | 47,03 | 43,16 | 37,05 | 39,34 | 43,65 | 33,85 |
| 12 | 48,76 | 39,22 | 41,05 | 38,09 | 43,31 | 36,01 |
| 13 | 48,31 | 40,07 | 36,54 | 39,10 | 41,92 | 38,20 |
| průměr vršek | 48,03 | 40,82 | 38,21 | 38,84 | 42,96 | 36,02 |
| 14 | 52,15 | 43,92 | 40,45 | 36,29 | 45,35 | 50,79 |
| 15 | 54,04 | 45,02 | 42,10 | 39,65 | 40,72 | 50,35 |
| průměr spodek | 53,10 | 44,47 | 41,28 | 37,97 | 43,04 | 50,57 |
| průměr 5 měření | 50,25 | 42,39 | 39,60 | 38,83 | 42,53 | 41,80 |
| údaje v MSm ⁻¹ | 4IA | 4IV | 4NA | 4NV | 4CA | 4CV |
| 16 | 41,58 | 39,85 | 43,02 | 38,68 | 42,44 | 39,18 |
| 17 | 44,97 | 43,04 | 38,60 | 36,58 | 39,55 | 37,05 |
| 18 | 44,25 | 39,48 | 37,07 | 38,25 | 40,19 | 39,30 |
| průměr vršek | 43,60 | 40,79 | 39,56 | 37,84 | 40,73 | 38,51 |
| 19 | 49,72 | 47,44 | 42,23 | 40,62 | 50,49 | 43,32 |
| 20 | 54,07 | 50,49 | 42,02 | 37,75 | 52,73 | 50,11 |
| průměr spodek | 51,90 | 48,97 | 42,13 | 39,19 | 51,61 | 46,72 |
| průměr 5 měření | 47,35 | 44,37 | 40,57 | 38,09 | 45,30 | 42,47 |
| údaje v MSm ⁻¹ | 5IA | 5IV | 5NA | 5NV | 5CA | 5CV |
| 21 | 45,78 | 38,91 | 47,02 | 36,25 | 39,42 | 36,71 |
| 22 | 44,49 | 40,20 | 37,01 | 36,17 | 38,77 | 35,42 |
| 23 | 45,23 | 39,45 | 41,55 | 32,42 | 38,43 | 35,96 |
| průměr vršek | 45,17 | 39,52 | 41,86 | 34,95 | 38,87 | 36,03 |
| 24 | 54,01 | 49,01 | 44,09 | 39,12 | 49,55 | 50,01 |
| 25 | 52,03 | 49,85 | 43,02 | 32,06 | 54,41 | 42,41 |
| průměr spodek | 53,02 | 49,43 | 43,56 | 35,59 | 51,98 | 46,21 |
| průměr 5 měření | 48,11 | 43,57 | 42,43 | 34,50 | 44,60 | 39,34 |
| průměr 25 měření | 48,48 | 42,72 | 41,36 | 37,41 | 44,87 | 39,17 |

Tabulka 6.5 Hodnoty vodivosti naměřené přístrojem Sigma test 2.069 třetí tavby

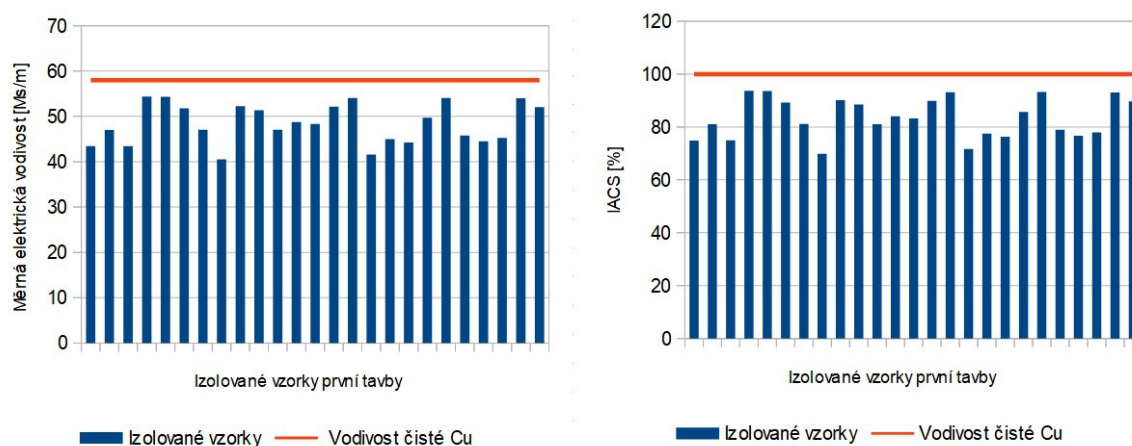
| údaje v MSm ⁻¹ | 1DI | 2DI | 1DC | 2DC | 1DN | 2DN |
|--------------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| 1 | 30,34 | 31,33 | 28,94 | 43,94 | 27,41 | 27,09 |
| 2 | 31,12 | 35,92 | 26,65 | 36,74 | 30,22 | 29,93 |
| 3 | 29,74 | 29,93 | 29,62 | 36,42 | 27,97 | 30,18 |
| 4 | 31,92 | 31,74 | 23,48 | 36,08 | 29,93 | 29,66 |
| 5 | 28,53 | 30,71 | 32,58 | 38,41 | 27,33 | 30,86 |
| 6 | 36,43 | 33,77 | 48,92 | 49,64 | 28,85 | 27,98 |
| 7 | 40,58 | 33,72 | 50,22 | 49,55 | 25,53 | 36,15 |
| 8 | 38,47 | 34,59 | 50,98 | 52,15 | 27,54 | 29,26 |
| 9 | 38,44 | 37,74 | 47,63 | 40,21 | 29,72 | 32,23 |
| 10 | 37,48 | 36,42 | 51,15 | 48,44 | 26,21 | 29,45 |
| průměr | 34,31 | 33,59 | 39,02 | 43,16 | 28,07 | 30,28 |
| 1 až 5 horní plocha průměr | 30,33 | 31,93 | 28,25 | 38,32 | 28,57 | 29,54 |
| 6 až 10 dolní plocha průměr | 38,28 | 35,248 | 49,78 | 47,998 | 27,57 | 31,014 |

Graficky jsou výsledky měření elektrické vodivosti pomocí Sigmatestu uvedeny na obr. 69 až obr. 77. Na každém obrázku graf vlevo zobrazuje vždy hodnoty měrné elektrické vodivosti v MS.m^{-1} pro daný vzorek. Druhý graf zobrazuje hodnoty vzorků ve stupnici IACS v procentech, tzn. procento vodivosti vzorku vzhledem k elektrické vodivosti čisté elektrovedné mědi. Červená přímka v grafech znázorňuje měrnou elektrickou vodivost čisté mědi (tj. 58 MS.m^{-1} , resp. 100% IACS).

V prvních třech níže uvedených obrázcích (obr. 69 až obr. 71) jsou popsány výsledky měření elektrické vodivosti vzorků z první tavby. Z výsledků je zřejmé, že zatímco u chlazených i izolovaných vzorků více než polovina měření dosáhla vodivosti alespoň 80% IACS, u vzorků chladnoucích jen ve formovací směsi byla hodnota naměřené vodivosti vyšší než 80 % IACS pouze v jednom případě.



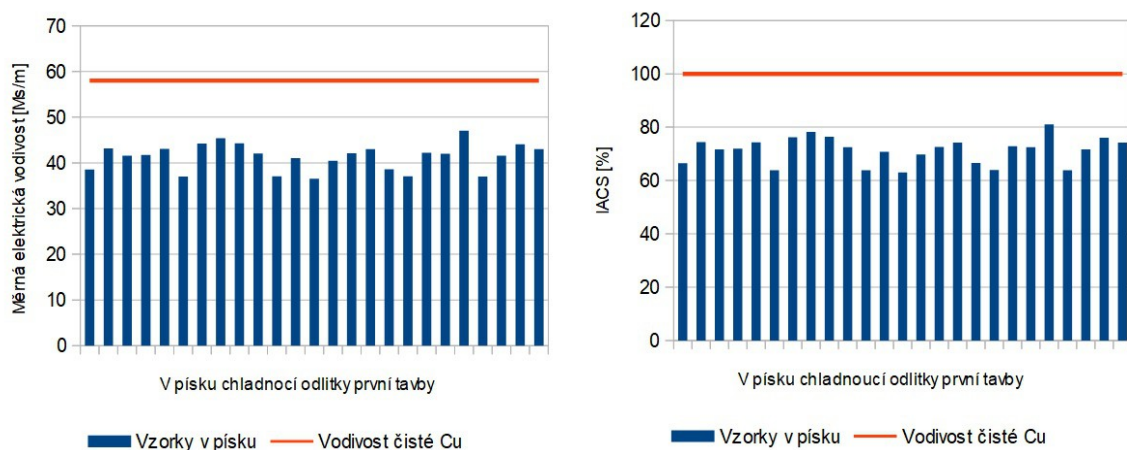
Obr. 69 Grafy měření elektrické vodivosti z první tavby u vzorků odlitků s chladítkem



Obr. 70 Grafy měření elektrické vodivosti z první tavby u vzorků odlitků s izolací

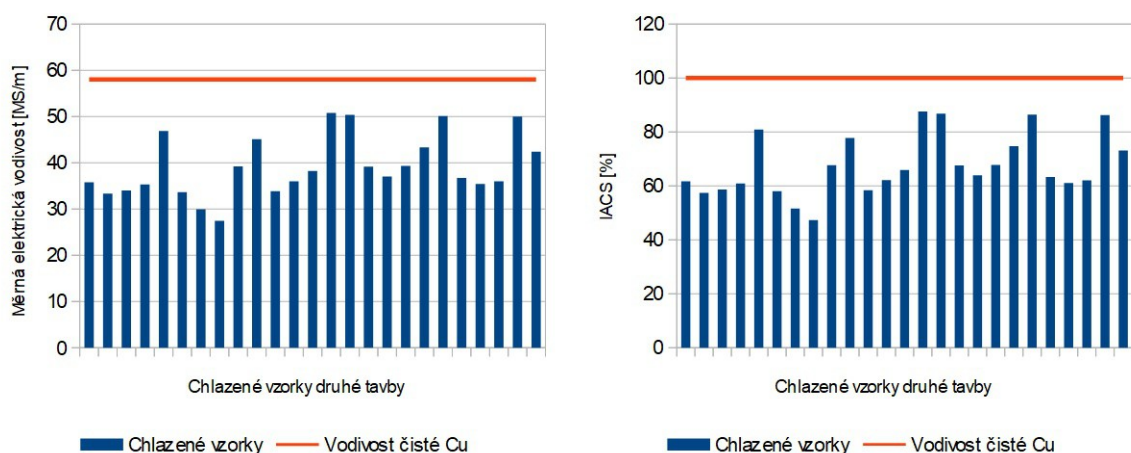
U izolovaných vzorků byl zjištěn nejvyšší počet vzorků, u kterých byla naměřena elektrická vodivost vyšší než 90% IACS. Tento fakt souvisí s rozložením dutin ve vzorcích, kdy většina dutin v izolovaných odlitcích byla rozložena v horní polovině vzorku (ve vršku). Měření elektrické vodivosti ve spodku odlitku pak v řadě případů vykazovalo hodnoty vodivosti vyšší než 90 % IACS. U vzorků z odlitků s chladítkem bylo sice ve vzorcích menší množství dutin, ty ale byly rozptýleny

v celém objemu. Vlastní dutiny u některých vzorků zásadně ovlivnily výsledky měření elektrické vodivosti.

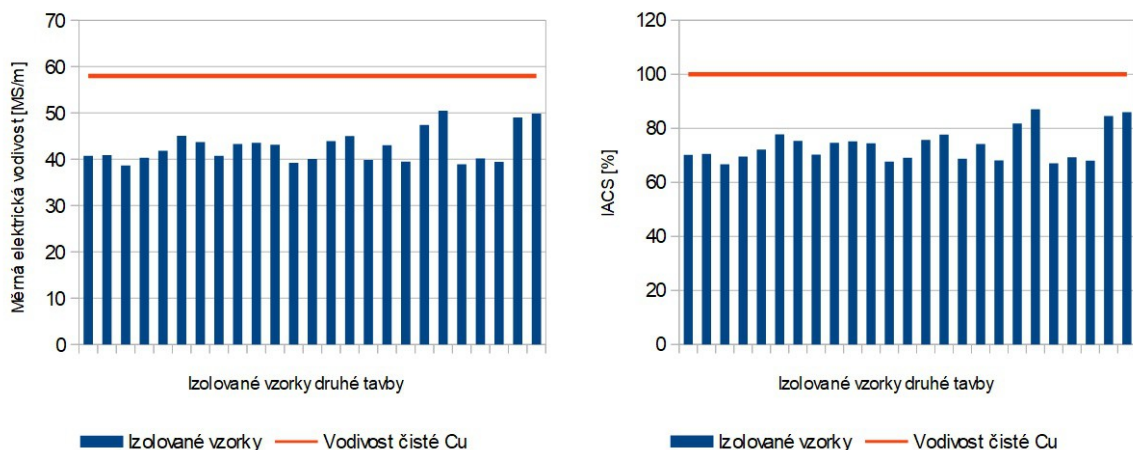


Obr. 71 Grafy měření elektrické vodivosti z první tavby u vzorků odlitků ve směsi

V obr. 72 až obr. 74 jsou uvedeny výsledky měření elektrické vodivosti vzorků z druhé tavby. Z výsledků je zřejmé, že u vzorků z chlazených odlitků bylo dosahováno širokého rozpětí hodnot vodivosti od cca 50 až do 90%. Z tohoto pohledu jsou výsledky naměřené u vzorků z chlazených odlitků horší, než v první tavbě.

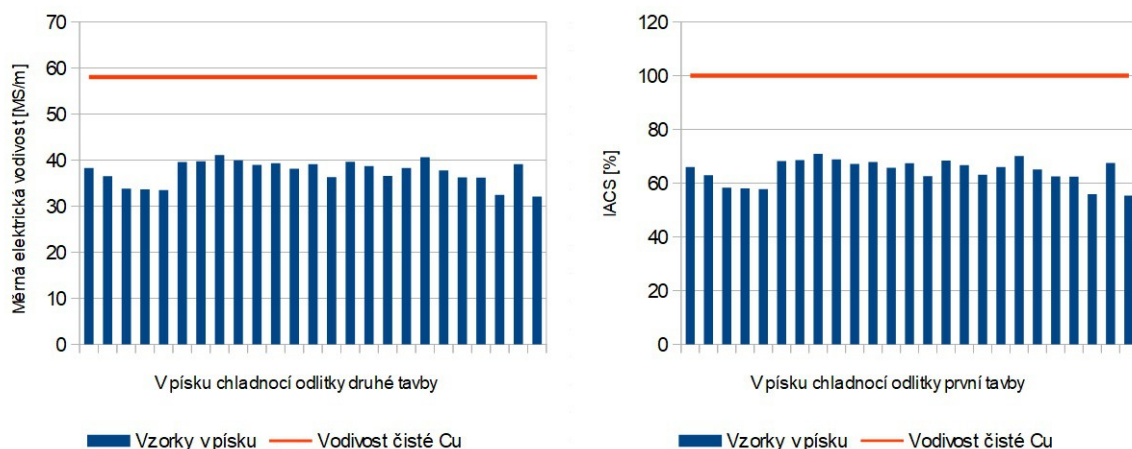


Obr. 72 Grafy měření elektrické vodivosti z druhé tavby u vzorků odlitků s chladítkem



Obr. 73 Grafy měření elektrické vodivosti z druhé tavby u vzorků odlitků s izolací

U vzorků 2. tavby odebraných z odlitků izolovaných a chladnoucích v písku jsou rozptýly naměřených hodnot vodivosti podstatně menší. Nižší naměřené hodnoty vodivosti byly zjištěny jak u izolovaných, tak i v písku chladnoucích odlitků. Střední hodnota vodivosti u vzorků z izolovaných odlitků se pohybuje okolo 75 % a u vzorků z odlitků chladnoucích ve formovací směsi pouze těsně přes 60 %.



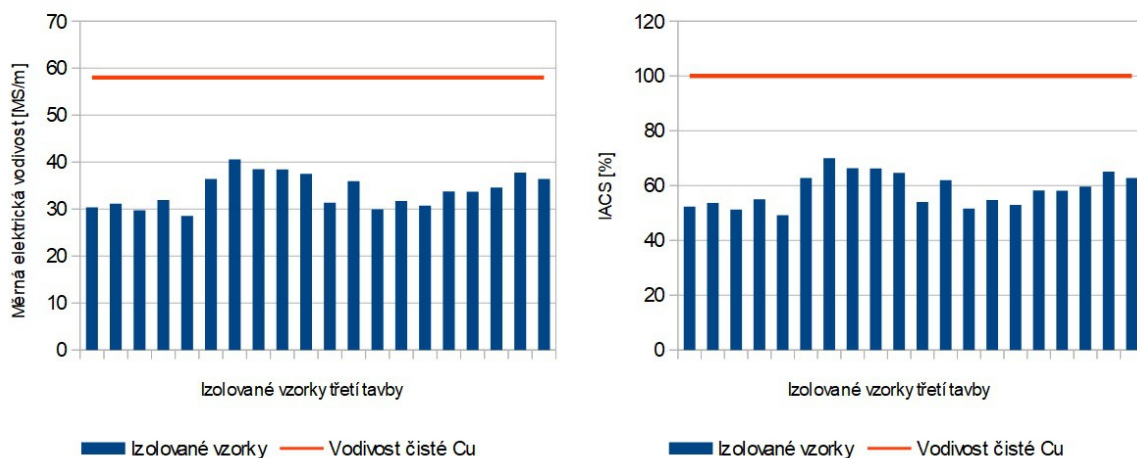
Obr. 74 Grafy měření elektrické vodivosti z druhé tavby u vzorků odlitků ve směsi

U vzorku z odlitků třetí tavby je opět patrné kolísání hodnot měření u vzorků z odlitků s chladítkem (viz obr. 75). Polovina měření přesahuje 80% IACS, zatímco druhá polovina kolísá mezi 40 a 60% IACS. Tento jev je opět způsoben místem měření na vzorku.



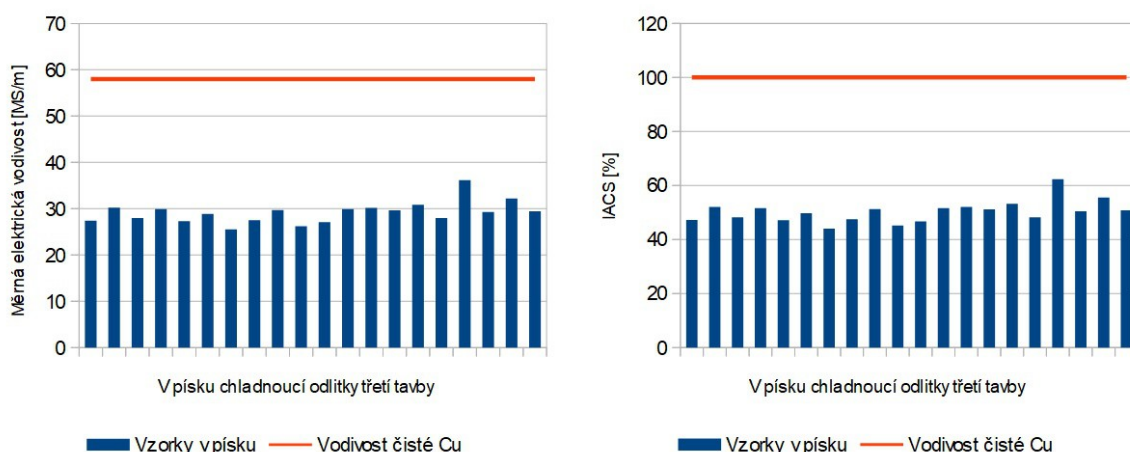
Obr. 75 Grafy měření elektrické vodivosti z třetí tavby u vzorků odlitků s chladítkem

Také u vzorků z izolovaných odlitků je zřetelné kolísání naměřené elektrické vodivosti v závislosti na místě měření, nicméně není tak výrazné jako v případě chlazených vzorků. Všechny hodnoty se pohybují v intervalu od 50 do 70% IACS – obr. 76. Naměřené vodivosti u izolovaných odlitků třetí tavby jsou nižší než u izolovaných odlitků z první a druhé tavby.



Obr. 76 Grafy měření elektrické vodivosti z třetí tavby u vzorků odlitků s izolací

U odlitků chlazených ve formovací směsi mezi vzorky měřenými ve vrchní a spodní polovině vzorku není významný rozdíl – viz obr. 77. To odpovídá tomu, že vzorky nebyly ovlivněné póry, čili mají na obou stranách srovnatelnou povrchovou i vnitřní jakost. Naměřené hodnoty elektrické vodivosti u těchto odlitků jsou nejnižší ze všech tří taveb za stejných podmínek tuhnutí. Většina naměřených hodnot se pohybuje okolo 50% IACS.



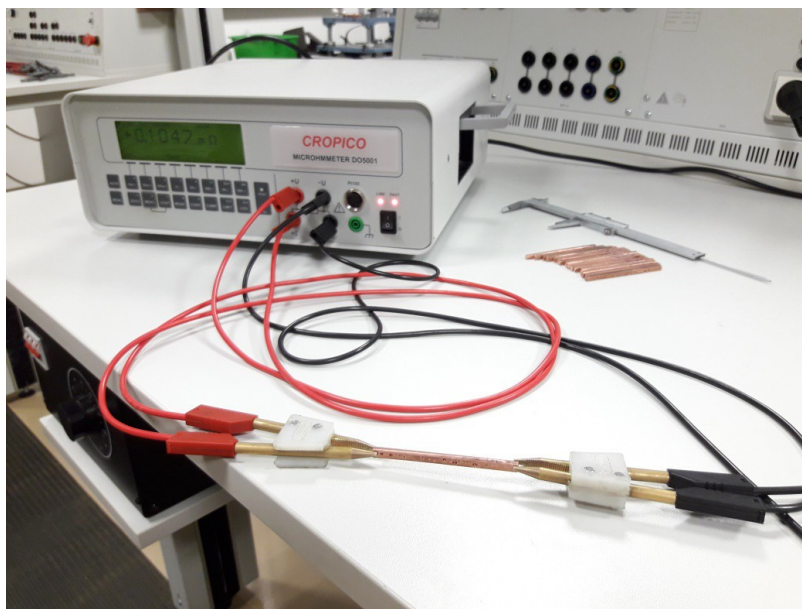
Obr. 77 Grafy měření elektrické vodivosti z třetí tavby u vzorků odlitků ve směsi

Výsledky měření elektrické vodivosti byly významně ovlivněny výskytem dutin a bublin. V případě měření ve spodních a horních partiích izolovaných odlitků a odlitků s chladítky byly stanoveny významné rozdíly v důsledku přítomnosti bublin. Použití vakua ve druhé tavně nevedlo ke snížení výskytu bublin. K potlačení vzniku bublin bylo nutné vakuovou metalurgii kombinovat s dezoxidací taveniny. Použitá dezoxidace však měla u odlitků ve formovací směsi a izolovaných odlitků vliv na snížení elektrické vodivosti a u odlitků s chladítkem vedla k velkým rozptylům dosažených hodnot od relativně dobrých po velmi špatné.

Měření elektrické odporu

Druhou metodou použitou pro měření elektrické vodivosti bylo měření odporu vzorků odebraných z odlitků odlitých v rámci výše uvedených tří taveb. Podstata měření spočívala v měření elektrického odporu, který klade zkušební vzorek proti průchodu stejnosměrného proudu. Elektrický odpor byl měřen pomocí mikroohmmetru Cropico DO5001 (obr. 78). Stanovení elektrického odporu vychází ze vztahu 2.1. Výsledná vodivost je pak určena jako převrácená hodnota naměřené rezistivity (odporu). Měření proběhlo ve spolupráci s FEKT. Měření provedl Ing. Josef Samek.

Pro měření odporu mikroohmmetrem bylo nutné vytvořit zkušební vzorky co nejmenšího průřezu a co největší délky. Vzorky byly vyrobeny obráběním z poloviny každého odlitku opatřeného chladítkem ve všech třech tavebách. Rozměr zkušebních vzorků měl průřez 4x4 mm a délku 75 mm. Vzorky byly vyrobeny z odlitků frézováním.



Obr. 78 Měření měrného odporu přístrojem Cropico DO5001

Při měření byla nastavena efektivní vzdálenost elektrod 70 mm, zbylých ~5 mm délky vzorku bylo použito pro připevnění měřicích krokosvorek. Výsledky a postup měření jsou uvedeny v protokolu z měření. Měření odporu vzorků probíhalo čtyřvodičovou metodou. [37]

Výsledky měření jsou uvedeny v tab. 6.6. V prvních dvou sloupcích je uvedeno značení vzorků. Ve třetím a čtvrtém sloupci jsou uvedeny průměrné hodnoty výšky a šířky (střední hodnoty vždy z 3 měření). V pátém sloupci jsou uvedeny průřezy vzorku a v šestém pak efektivní délka vzorku. V sedmém sloupci je uvedena hodnota R_{CCu} , která představuje teoretický odpor čisté mědi stejného průřezu a délky jako zkoušený vzorek.

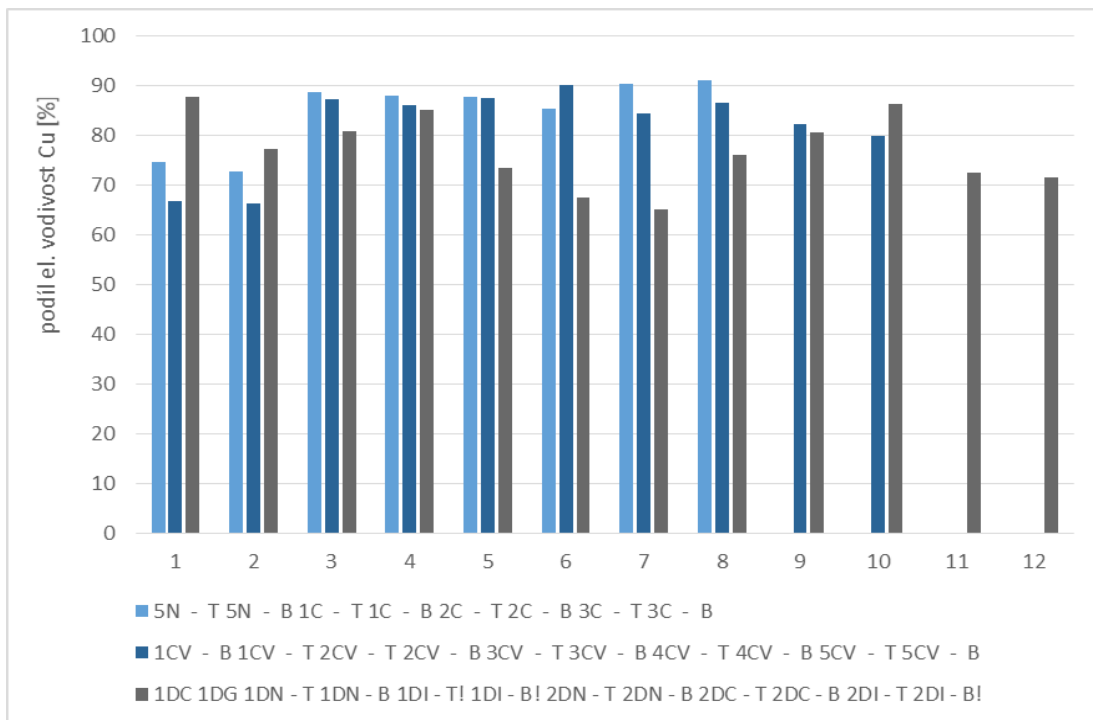
V osmém a devátém sloupci jsou uvedeny naměřené odpory vzorků, které měřili z různých stran (R_{VCuX} , R_{VCuY}). V desátém sloupci jsou pak uvedeny hodnoty R_{VCu} , představující průměrnou hodnotu naměřené rezistence.

Hodnoty $U_A R$ jsou nejistoty měření typu A – směrodatná odchylka. Hodnota δ je relativní chyba. $U_B R$ je nejistota měření typu B – chyba přístroje. $U_C R$ je kombinovaná nejistota měření [37]. V posledním sloupci jsou pak hodnoty naměřené, resp. vypočtené elektrické vodivosti.

Tabulka 6.6 Naměřené a vypočtené hodnoty při použití Cropico DO5001

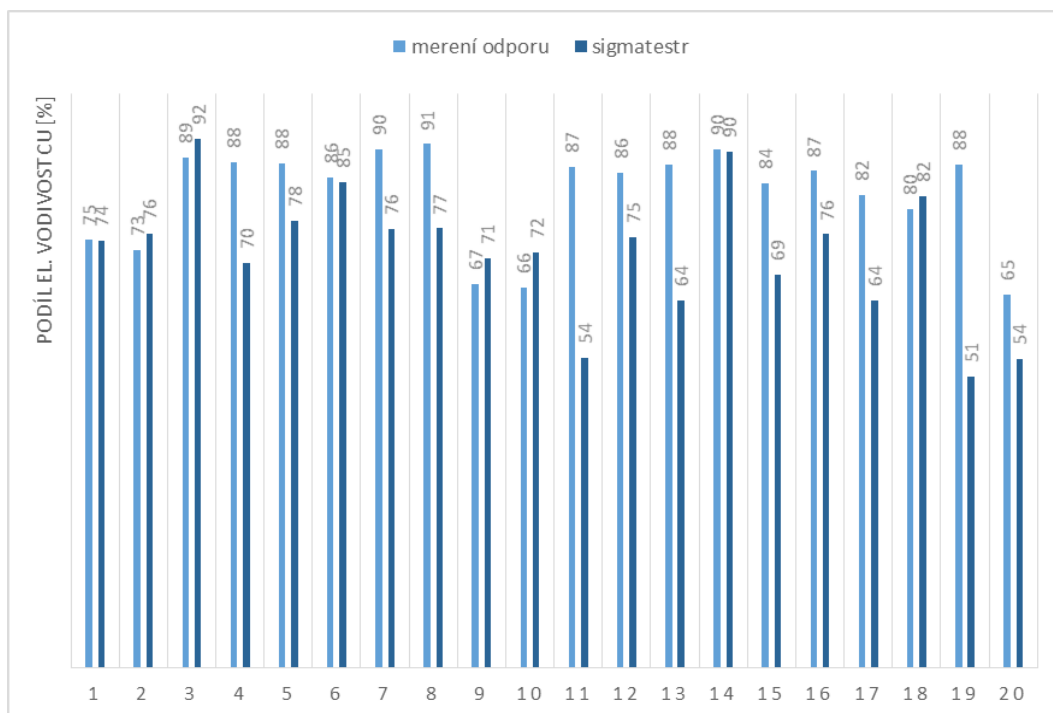
| Vzorek | V avg. | Š avg. | S Cu | Efektivní délka | R_{CCu} | R_{VCuX} | R_{VCuY} | R_{VCu} | $U_A R$ | δ | $U_B R$ | $U_C R$ | Konduktivita |
|----------|--------|--------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|--------------------|-------------|--------------|
| | mm | mm | mm ² | m | $\mu\Omega$ | $\mu\Omega$ | $\mu\Omega$ | $\mu\Omega$ | $\mu\Omega$ | % | $\mu\Omega$ | $\mu\Omega$ | MS/m |
| 5N - T | 3,96 | 4,08 | 16,1 | 0,07 | 0,0 | 103,7 | 103,1 | 103,4 | 0,3 | 0,32 | 0,3 | 0,4 | 41,9 |
| 5N - B | 4,00 | 4,10 | 16,4 | 0,07 | 0,0 | 104,2 | 104,4 | 104,3 | 0,1 | 0,32 | 0,3 | 0,3 | 40,9 |
| 1C - T | 3,96 | 3,98 | 15,8 | 0,07 | 0,0 | 89,5 | 88,5 | 89,0 | 0,5 | 0,37 | 0,3 | 0,6 | 49,9 |
| 1C - B | 4,14 | 4,19 | 17,3 | 0,07 | 0,0 | 81,6 | 81,5 | 81,6 | 0,0 | 0,40 | 0,3 | 0,3 | 49,5 |
| 2C - T | 3,95 | 3,84 | 15,2 | 0,07 | 0,0 | 93,00 | 93,90 | 93,5 | 0,5 | 0,35 | 0,3 | 0,6 | 49,4 |
| 2C - B | 3,99 | 3,89 | 15,5 | 0,07 | 0,0 | 94,30 | 93,60 | 94,0 | 0,4 | 0,35 | 0,3 | 0,5 | 48,1 |
| 3C - T | 3,80 | 3,76 | 14,3 | 0,07 | 0,0 | 97,5 | 95,3 | 96,4 | 1,1 | 0,34 | 0,3 | 1,1 | 50,8 |
| 3C - B | 4,16 | 3,89 | 16,2 | 0,07 | 0,0 | 83,6 | 85,1 | 84,4 | 0,8 | 0,39 | 0,3 | 0,8 | 51,3 |
| 1CV - B | 4,23 | 4,10 | 17,3 | 0,07 | 0,0 | 106,7 | 108,1 | 107,4 | 0,7 | 0,31 | 0,3 | 0,8 | 37,6 |
| 1CV - T | 3,80 | 4,24 | 16,1 | 0,07 | 0,0 | 117 | 116,5 | 116,8 | 0,3 | 0,29 | 0,3 | 0,4 | 37,2 |
| 2CV - T | 4,10 | 4,18 | 17,1 | 0,07 | 0,0 | 83,50 | 83,20 | 83,4 | 0,1 | 0,39 | 0,3 | 0,4 | 49,1 |
| 2CV - B | 4,26 | 3,84 | 16,4 | 0,07 | 0,0 | 88,40 | 88,20 | 88,3 | 0,1 | 0,37 | 0,3 | 0,3 | 48,5 |
| 3CV - T | 4,10 | 3,93 | 16,1 | 0,07 | 0,0 | 88,20 | 88,40 | 88,3 | 0,1 | 0,37 | 0,3 | 0,3 | 49,3 |
| 3CV - B | 4,15 | 4,08 | 16,9 | 0,07 | 0,0 | 81,30 | 81,90 | 81,6 | 0,3 | 0,40 | 0,3 | 0,4 | 50,7 |
| 4CV - T | 4,08 | 4,13 | 16,8 | 0,07 | 0,0 | 88,40 | 87,10 | 87,8 | 0,7 | 0,37 | 0,3 | 0,7 | 47,5 |
| 4CV - B | 4,13 | 4,15 | 17,1 | 0,07 | 0,0 | 83,80 | 84,30 | 84,1 | 0,3 | 0,39 | 0,3 | 0,4 | 48,7 |
| 5CV - T | 3,89 | 3,68 | 14,3 | 0,07 | 0,0 | 105,40 | 106,30 | 105,9 | 0,4 | 0,31 | 0,3 | 0,6 | 46,3 |
| 5CV - B | 4,09 | 4,10 | 16,8 | 0,07 | 0,0 | 92,80 | 93,20 | 93,0 | 0,2 | 0,35 | 0,3 | 0,4 | 44,9 |
| 1DC | 4,05 | 4,15 | 16,8 | 0,065 | 0,0 | 78,6 | 78,20 | 78,4 | 0,2 | 0,41 | 0,3 | 0,4 | 49,3 |
| 1DG | 3,95 | 4,15 | 16,4 | 0,065 | | 91,6 | 91,00 | 91,3 | 0,3 | 0,36 | 0,3 | 0,4 | 43,4 |
| 1DN - T | 4,04 | 4,10 | 16,6 | 0,065 | | 86,3 | 86,40 | 86,4 | 0,1 | 0,38 | 0,3 | 0,3 | 45,5 |
| 1DN - B | 4,05 | 4,00 | 16,2 | 0,065 | | 83,2 | 84,30 | 83,8 | 0,5 | 0,39 | 0,3 | 0,6 | 47,9 |
| 1DI - T! | 4,04 | 4,10 | 16,6 | 0,05 | | 72,5 | 73,50 | 73,0 | 0,5 | 0,44 | 0,3 | 0,6 | 41,4 |
| 1DI - B! | 4,10 | 4,15 | 17,0 | 0,05 | | 77,0 | 77,90 | 77,5 | 0,5 | 0,42 | 0,3 | 0,6 | 37,9 |
| 2DN - T | 4,11 | 4,05 | 16,7 | 0,065 | | 106,4 | 106,90 | 106,7 | 0,3 | 0,31 | 0,3 | 0,4 | 36,6 |
| 2DN - B | 4,18 | 4,30 | 18,0 | 0,065 | | 84,1 | 85,30 | 84,7 | 0,6 | 0,38 | 0,3 | 0,7 | 42,7 |
| 2DC - T | 4,08 | 3,95 | 16,1 | 0,065 | | 88,8 | 89,50 | 89,2 | 0,4 | 0,37 | 0,3 | 0,5 | 45,3 |
| 2DC - B | 4,18 | 4,10 | 17,1 | 0,065 | | 78,1 | 78,50 | 78,3 | 0,2 | 0,41 | 0,3 | 0,4 | 48,5 |
| 2DI - T | 3,99 | 3,70 | 14,8 | 0,065 | | 107,4 | 108,90 | 108,2 | 0,8 | 0,31 | 0,3 | 0,8 | 40,7 |
| 2DI - B! | 3,7875 | 4,25 | 16,1 | 0,05 | | 77,3 | 77,1 | 77,2 | 0,1 | 0,42 | 0,3 | 0,3 | 40,2 |
| | | | | | | | | | | | Velektrovodná měď: | | 56,2 |

Na obr. 79 jsou graficky znázorněny výsledky měření elektrické vodivosti z tab. 6.6. Jedná se o hodnoty stanovené u vzorků z odlitků opatřených chladítkem. Z průběhu naměřených vodivostí je zřejmé, hodnoty u vzorků první a druhé tavby jsou zcela srovnatelné. Dezoxidace vakuované třetí tavby sice vedla k potlačení vzniku bublin, ale měla negativní vliv na hodnoty naměřené vodivosti.



Obr. 79 Výsledky měření elektrické vodivosti ve vzorcích z odlitků s chladítky první až třetí tavby

Na obr. 80 je uvedeno srovnání obou metod měření elektrické vodivosti u vzorků z odlitků s chladítky všech tří taveb. Porovnáním jednotlivých hodnot u stejných vzorků je zřejmé, že obě metody jsou srovnatelné. Rozdíly, které byly v některých případech zjištěny, pravděpodobně souvisí s přítomností dutin (ředin) ve sledovaných vzorcích. Jedná se o vzorky vždy z jednoho odlitku, ale z rozdílných polovin odlitku. Vzorky tak nejsou zcela identické.



Obr. 80 Výsledky měření elektrické vodivosti ve vzorcích z odlitků s chladítky první až třetí tavby pomocí sigmatesteru a pomocí měření rezistivity

6.3.2 STATISTICKÉ ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI

Všechny získané hodnoty elektrické vodivosti z měření Sigmatestem z tabulek 6.4 a 6.5 a z měření mikroohmmetrem z tabulky 6.6 byly statisticky zpracovány v programu Minitab 17. Rozsah vzniklého souboru dat $n=240$ hodnot elektrické vodivosti. Hodnota naměřené elektrické vodivosti je nezávisle proměnnou, která je vyjádřena v jednotkách $MS.m^{-1}$.

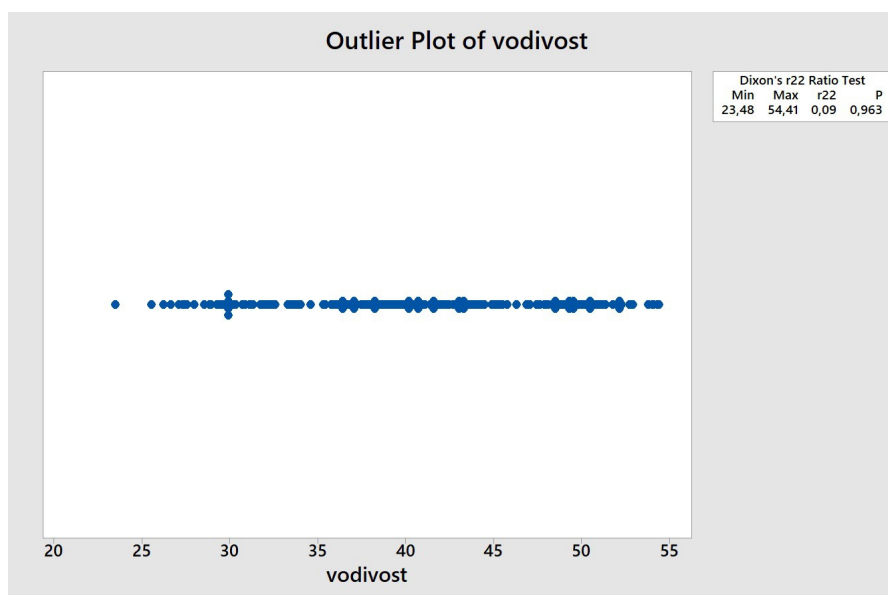
Pro rozřazení vstupních parametrů bylo vybráno deset nezávisle proměnných, které vstupovaly do procesu. Proměnné jsou diskrétní hodnoty těchto parametrů - formy, tavení, polohy a péče. V tab. 6.7 jsou uvedeny jednotlivé parametry, možné stavy, ve kterém se daná proměnná může nacházet a hodnoty jaké daná proměnná může nabývat za určitých podmínek.

Tab. 6.7 Nezávisle proměnné souboru elektrické vodivosti, možné stavy a hodnoty kritérií

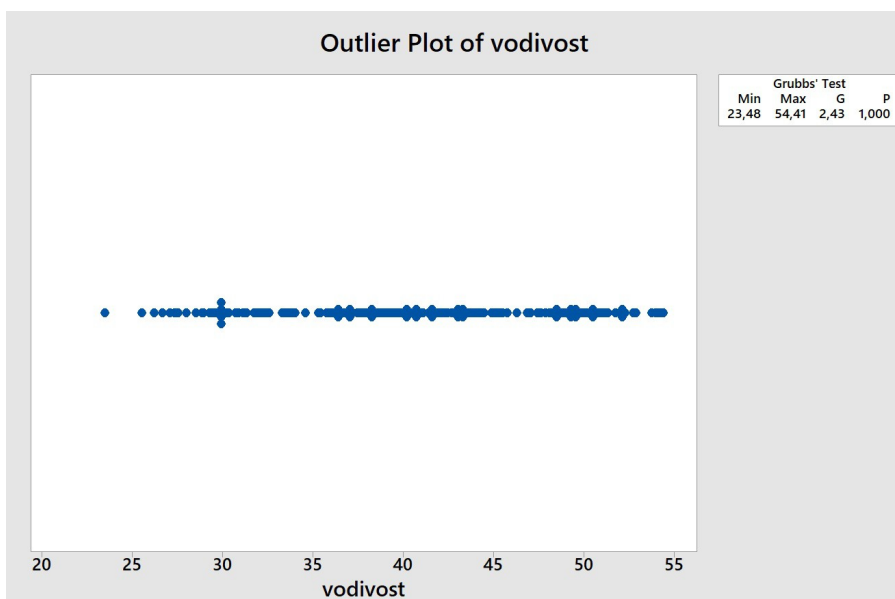
| Parametr | Stav | Možné hodnoty | Kritérium |
|----------|---------|---------------|----------------|
| forma | cooler | 1 | byla použita |
| | | 0 | nebyla použita |
| | izo | 1 | byla použita |
| | | 0 | nebyla použita |
| | natur | 1 | byla použita |
| | | 0 | nebyla použita |
| tavení | atmo | 1 | proběhlo |
| | | 0 | neproběhlo |
| | vakuum | 1 | proběhlo |
| | | 0 | neproběhlo |
| poloha | p | 1 | byla měřena |
| | | 0 | nebyla měřena |
| | s | 1 | byla měřena |
| | | 0 | nebyla měřena |
| | v | 1 | byla měřena |
| | | 0 | nebyla měřena |
| péče | desox | 1 | proběhla |
| | | 0 | neproběhla |
| | nedesox | 1 | proběhla |
| | | 0 | neproběhla |

Pomocí statistického zhodnocení bylo hodnoceno, zda má daný parametr vliv na elektrickou vodivost nebo ne. V případě že vliv má, má daný parametr hodnotu 1 násobený vypočteným koeficientem.

Prvním krokem statistické analýzy bylo určit, zda soubor obsahuje odlehlé hodnoty (hrubé chyby). Pro hodnocení byl použit Dixonův test (obr. 81) a Grubbsův test (obr. 82) pro vyloučení odlehlých výsledků. Soubor neobsahuje hrubé chyby na hladině významnosti $\alpha=0,05$ jestliže p-hodnota daného testu je vyšší než 0,05. Jak vyplývá z obr. 81, a obr. 82 jsou p-hodnoty obou testů vyšší, než 0,05. To znamená, že na hladině významnosti $\alpha=0,05$ neobsahuje soubor hrubé chyby.

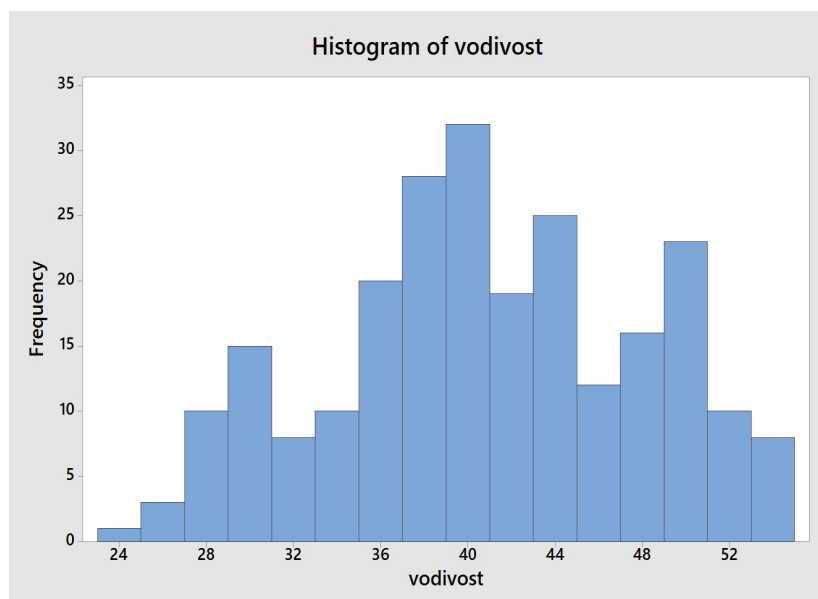


Obr. 81 Dixonův test odlehlých hodnot



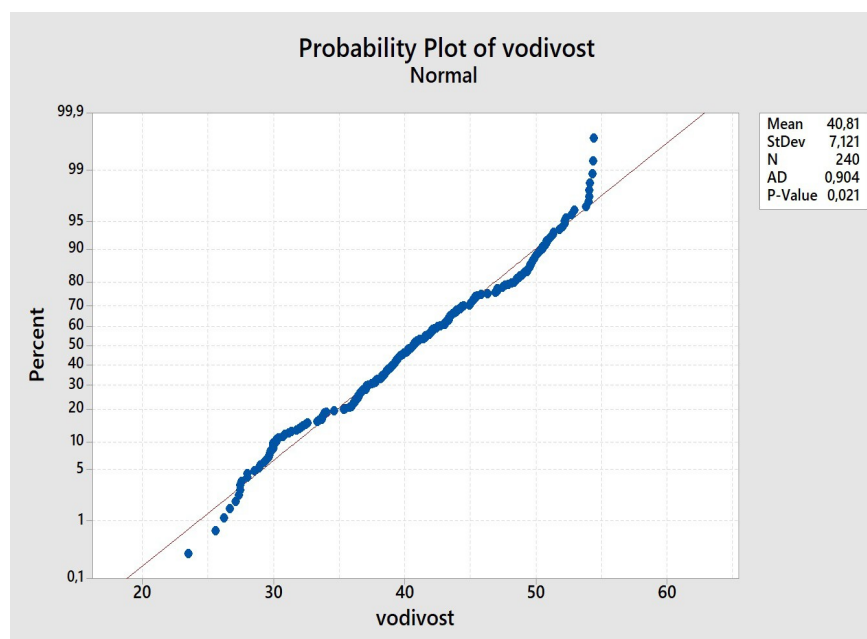
Obr. 82 Grubbsův test odlehlých hodnot

Na obr. 83 je uveden histogram četnosti rozložení elektrické vodivosti všech měřených vzorků oběma metodami.



Obr. 83 Histogram statistického souboru

Pro ověření normality rozdělení souboru byl proveden Anderson-Darlingův test na hladině významnosti $\alpha=0,05$ (obr. 84). P hodnota Anderson-Darlingova testu je 0,021 a tedy se spolehlivostí 95 % nemá tento soubor normální rozdělení.



Obr. 84 Test normality s kritériem $\alpha=0,05$

Jelikož soubor nemá normální rozdělení, nemohl být použit test rovnosti střední hodnoty (T-test) ani test rovnosti rozptylu (F-test). Pro pozorování vlivu jednotlivých parametrů byla použita analýza rozptylu (ANOVA). Nulová testovaná hypotéza je nezávislost vodivosti na daném faktoru, tzn. nezávislost na formě, tavení, poloze a péči (viz. tab. 6.7).

Na obr. 85 je uveden výsledek analýzy ANOVA z programu Minitab 17. Nulové p-hodnoty u jednotlivých parametrů naznačují, že zamítáme se spolehlivostí 95 % nulovou hypotézu u všech zvolených parametrů. Z toho plyne, že naměřené hodnoty vodivosti jsou závislé na všech 4 zvolených parametrech. Vytvořený regresní model dle hodnoty R^2 odpovídá z 59,61% hodnotě elektrické vodivosti.

| Analysis of Variance | | | | | |
|----------------------|-----|---------|---------|---------|---------|
| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
| forma | 2 | 1405,6 | 702,81 | 33,46 | 0,000 |
| tavení | 1 | 915,0 | 915,01 | 43,56 | 0,000 |
| poloha | 2 | 2493,5 | 1246,74 | 59,35 | 0,000 |
| péče | 1 | 967,6 | 967,61 | 46,06 | 0,000 |
| Error | 233 | 4894,5 | 21,01 | | |
| Lack-of-Fit | 17 | 2613,9 | 153,76 | 14,56 | 0,000 |
| Pure Error | 216 | 2280,5 | 10,56 | | |
| Total | 239 | 12119,0 | | | |

| Model Summary | | | |
|---------------|--------|-----------|------------|
| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
| 4,58326 | 59,61% | 58,57% | 57,01% |

Obr. 85 Výsledek analýzy ANOVA

Na obr. 86 je vyjádřená lineární regresní funkce společně s koeficienty, které v ní vystupují. Každá neznámá parametru v této rovnici nabývá hodnoty 0 nebo 1 v závislosti na typu parametru. Dle p-hodnot mají všechny koeficienty vliv na regresní funkci. Všechny koeficienty a počáteční konstanta mají jednotku MS.m^{-1} . Výsledné hodnoty koeficientů jednotlivých nezávisle proměnných jsou uvedeny v tab. 6.8.

| Term | Coef | SE Coef | T-Value | P-Value | VIF |
|----------|--------|---------|---------|---------|------|
| Constant | 41,856 | 0,413 | 101,40 | 0,000 | |
| forma | | | | | |
| cooler | 1,511 | 0,420 | 3,60 | 0,000 | 1,39 |
| izo | 1,974 | 0,432 | 4,57 | 0,000 | 1,33 |
| tavení | | | | | |
| atmo | 2,334 | 0,354 | 6,60 | 0,000 | 1,30 |
| poloha | | | | | |
| p | 3,367 | 0,616 | 5,46 | 0,000 | 2,10 |
| s | 1,265 | 0,454 | 2,79 | 0,006 | 2,02 |
| péče | | | | | |
| desox | -2,519 | 0,371 | -6,79 | 0,000 | 1,32 |

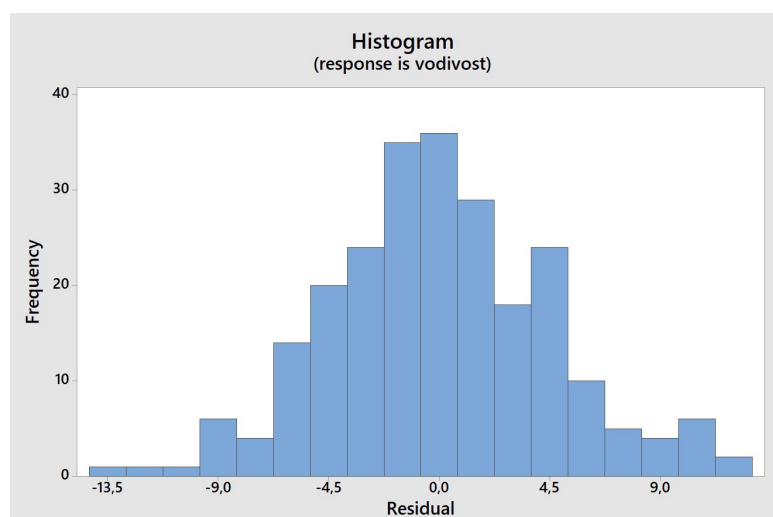
| Regression Equation | |
|---|--|
| vodivost = 41,856 + 1,511 forma_cooler + 1,974 forma_izo - 3,485 forma_natur + 2,334 tavení_atmo - 2,334 tavení_vakuum + 3,367 poloha_p + 1,265 poloha_s - 4,632 poloha_v - 2,519 péče_desox + 2,519 péče_nedesox | |

Obr. 86 Regresní lineární funkce vypočtená metodou ANOVA

Tab. 6.8 Konstanty nezávisle proměnných veličin regresní funkce

| Nezávisle proměnná | Koeficient proměnné |
|--------------------|---------------------|
| cooler | 1,511 |
| izo | 1,974 |
| natur | -3,485 |
| atmo | 2,334 |
| vakuum | -2,334 |
| p | 3,367 |
| s | 1,265 |
| v | -4,632 |
| desox | -2,519 |
| nedesox | 2,519 |

Na obr. 87 je nakreslen histogram četnosti odchylek výsledků regresní funkce od skutečných hodnot naměřené elektrické vodivosti.



Obr. 87 Histogram odchylek od regresní funkce

Provedená statistická analýza měla za cíl ověřit, které z nezávisle proměnných veličin v experimentu měly statisticky významný vliv na odezvu, tj. na hodnotu nezávisle proměnné. Analýzou bylo potvrzeno, že na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ mají vliv všechny 4 sledované parametry, tj. podmínky tuhnutí (forma), způsob tavení (na vzduchu, ve vakuu), poloha měření vzorku (vršek, spodek, vnitřek mikroohmetrem - p) i péče (dezoxidace, bez dezoxidace). Stanovenou rovnicí, resp. z ní stanovené výsledky je nutné uvažovat spíše jen kvalitativně. To vychází z nízké hodnoty R^2 (59,61) i hodnoty Lack-of-Fit regresního modelu.

ZÁVĚR

Pro vlastní experiment byl zvolen jednoduchý zkušební odlitek, u kterého byly pomocí chladítek a izolace měněny podmínky tuhnutí. Ve třech tavnách bylo odlito 36 odlitků se třemi druhy metalurgického zpracování a třemi podmínkami tuhnutí. Jednotlivé odlitky byly rozřezány a bylo u nich provedeno hodnocení pórovitosti, struktury a měření elektrické vodivosti. Naměřené hodnoty elektrické vodivosti byly následně zpracovány pomocí statistické analýzy. Z výsledků provedených měření a zkoušek vyplynulo následující:

- Při redukčním vedení tavby na vzduchu došlo k tvorbě bublin ve všech sledovaných odlitcích. Použití izolace nebo chladítka vedlo ke snížení výskytu bublin nebo jejich lokalizaci do horní partie odlitku. Uvedené dutiny měly významný vliv na hodnotu elektrické vodivosti. U žádného z odlitků nebylo dosaženo požadované hodnoty elektrické vodivosti.
- Použití vakuového zpracování v tavně 2 nevedlo k požadovanému snížení výskytu bublin. Dosažené výsledky, jak z pohledu výskytu bublin, tak i naměřené elektrické vodivosti byly srovnatelné s tavnou 1. Obsah kyslíku v tavně 2 byl vyšší než při tavení na vzduchu redukčním způsobem. Vyšší koncentrace kyslíku v tavně 2 korelovala s větším podílem eutektika Cu-Cu₂O ve struktuře vzorku tavby dvě.
- V tavně 3 byla kromě vakuování použita též dezoxidace zinkem a hliníkem. Koncentrace zinku po dezoxidaci činila 0,014% a obsah hliníku se nezměnil. Jak ukázaly výsledky hodnocení pórovitosti, výskyt bublin byl nižší než v předcházejících dvou tavnách. V případě vzorků z odlitku s chladítkem se v odlitcích vyskytovaly rozptýlené dutiny – řediny. Výsledky prokázaly, že k eliminaci bublin je nutné řešit i problematiku dezoxidace taveniny. Naměřené výsledky elektrické vodivosti vykazují vyšší rozptyl a naměřený soubor obsahuje relativně vysoké a naopak relativně nízké hodnoty elektrické vodivosti u izolovaných vzorků. U vzorků s chladítkem nebo vzorků z odlitku ve formovací směsi byly naměřeny hodnoty průměrně do 70% IACS. Ve vzorcích po dezoxidaci byl stanoven nejvyšší obsah kyslíku ze všech tří taveb. Nejvyšší koncentrace kyslíku byla potvrzena i metalografickým hodnocením, kdy se vy struktuře nacházel vysoký podíl eutektika Cu-Cu₂O.

Provedené experimenty prokázaly vliv podmínek tuhnutí a použitého metalurgického zpracování na strukturu a vlastnosti odlitků z elektrovodné mědi. Nižší hodnoty elektrické vodivosti byly ovlivněny zejména výskytem dutin. Použití dezoxidace taveniny vedlo ke snížení výskytu bublin, ale výsledky byly negativně ovlivněny výskytem ředin a mikrostaženin. Pro další práci lze doporučit použití vhodnějšího modelu odlitku, u kterého bude zajištěno usměrněné tuhnutí a v oblasti metalurgie se zabývat problematikou dezoxidace taveniny a jejího vlivu na elektrickou vodivost.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DAVIS, Joseph R. *Copper and Copper Alloys ASM specialty handbook*. Michigan: ASM International, 2001, 652 s. ISBN 0-87170-726-8.
- [2] *Neželezné kovy*. Ústí nad Labem: Štefan Michna, Lenka Michnová, 2014, 245 s. il. ISBN 978-80-260-7132-7.
- [3] Výroba a osazování plošných spojů. *Návrh a vývoj zakázkové elektroniky* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.smishek.com/zakazkovy-navrh-plosnych-spoju.html>
- [4] PRIMECOOLER PC-IL771D-2U, chladič CPU, LGA 771, 2U, pasivní, měděný. *SUNTECH* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.suntech.cz/produkt/180119-primecooler-pc-il771d-2u-chladic-cpu-lga-771-2u-pasivni-medeny/>
- [5] MACEK, Karel. 3. *STRUKTURA A VLASTNOSTI MATERIÁLU A JEJICH ZKOUŠENÍ: 3.3 Fyzikální vlastnosti* [online]. In: . Praha: ČVUT [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3-3_fyzikalni_vlastnosti.pdf
- [6] Socha Jana Žižky z Trocnova, Přibyslav. *Kraj Vysočina: Kulturní a přírodní dědictví* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: http://www.dedictvivysociny.cz/kultura/pamatky-50/dila_umelcu-16/?id=1323
- [7] Restaurace celá v mědi. *Robert Orel METALWORKS* [online]. 2018 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://www.foglpikna.cz/galerie/med/medeny-bar/index.html>
- [8] Svařitelnost materiálů. *ÚPT AVČR* [online]. Brno: AVČR, 2010 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://ebt.isibrno.cz/svaritelnost-materialu>
- [9] Hygienická klika, na co si dát při výběru pozor. *Holar czech handlers* [online]. 2016 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://blog.holar.biz/hygienicka-klika-na-co-si-dat-pri-vyberu-pozor/>
- [10] KELČA, Mojmír. Nový důkaz antimikrobiální účinnosti mědi. *Měděné rozvody* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://medenerozvody.cz/news/novy-dukaz-antimikrobialni-ucinnosti-medi>
- [11] EM Brno: Nevýbušné asynchronní elektromotory. *Profi elektrika* [online]. c1998-2018 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/embrno-nevybusne-asynchronni-elektromotory>
- [12] Terminais De Fio De Cobre Conectores Bloco DT. *JHY Grounding and Lightning products* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://cz.cncoppercladsteel.com/grounding-accessories/copper-wire-terminals-connectors-block-dt.html>

- [13] SEDLÁČEK, Vladimír. *Neželezné kovy a slitiny*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, n.p., 1979, 400 s. il.
- [14] BENEŠ, Antonín, František DRASTÍK, Zdeněk HOSTINSKÝ, Jaroslav KOUTSKÝ a Josef NĚMEC. *Nauka o kovech: učebnice pro elektrotechn. fakulty*. Praha: SNTL, 1972, 355 s.
- [15] 3. Kvantová čísla. VOŠ SPŠ Kladno [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://xeon.spskladno.cz/~raichova/kvant.html>
- [16] GEOMETRICKÉ PRINCIPY DIFRAKCE. *Krystalografická společnost: Czech and Slovak Crystallographic Association (CSCA)* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://www.xray.cz/kurs/difrakce.htm>
- [17] Brillouin Zones. *MSE 5317: Electronic Properties of Materials* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://electrons.wikidot.com/brillouin-zones>
- [18] KfV Foil Strain Gage for Hydrogen Gas Environment. KYOWA [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: http://www.kyowa-ei.com/jpn/product/category/strain_gages/kfv/index.html
- [19] MAZANEC, Karel. *Fyzikální metalurgie neželezných kovů a složených materiálů*. 2. vyd. Ostrava: VŠB, 1987, 148 s. il.
- [20] GRÍGEROVÁ, Tatiana, Ivan LUKÁČ a Rudolf KOŘENÝ. *Zlievarenstvo neželezných kovov*. Bratislava: Alfa - Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, n.p., 1988. 424 s. il. Edícia hutníckej literatúry.
- [21] NĚMEC, Milan a Jaroslav PROVAZNÍK. *Slévárenské slitiny neželezných kovů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 137 s, il. ISBN 978-80-01-04116-1.
- [22] PÍŠEK, František, Adolf PLEŠINGER a Zdeněk HOSTINSKÝ. *Slévárství I: / Obecná část*. 2., přeprac. a dopln. vyd. Praha: SNTL, 1974, 499 s. il.
- [23] Phase Diagrams & Computational Thermodynamics: Cu-Pb System. *Material Measurement Laboratory* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/cupb.html>
- [24] Phase Diagrams & Computational Thermodynamics: Bi-Cu System. *Material Measurement Laboratory* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/bicu.html>
- [25] SULAYMON, Abbas Hamid, Sawsan A. M. MOHAMMED a Ali Hussein ABBAR. Characterization and Electrochemical Preparation of Thin Films of Binary Heavy Metals (Cu-Pb,Cu-Cd,Cu-Zn) from Simulated Chloride Wastewaters. *International Journal of ELECTROCHEMICAL SCIENCE* [online]. 2014, 11(9), 6328-6351 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/287317290_Characterization_and_Ele

- [26] Question: Problem 2 (0.5 pt max). *Chegg Study* [online]. c2003-2018 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/problem-2-05-pt-max--copper-silver-cu-ag-phase-diagram-shown-figure--eutectic-temperature--q9529587>
- [27] CHAKRABARTI, D. J. a D. E. LAUGHLIN. The Cr-Cu (Chromium-Copper) system. *Journal of Phase Equilibria* [online]. 1984, **5**(1), 59-68 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/227224724_The_Cr-Cu_Chromium-Copper_system
- [28] PASTUCHOVOVÁ, Ř. P, A.G RACHŠTADT a A.G. ŘEZNIČKOVÁ. *Pružinové slitiny mědi*. Praha: SNTL, 1986, 276 s. il.
- [29] Cu-P (Copper-Phosphorus). *SpringerLink* [online]. 2017 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F10086090_1099
- [30] WANG, C. P., X. J. LIU, I. OHNUMA, R. KAINUMA a K. ISHIDA. Thermodynamic Database of the Phase Diagrams in Cu-Fe Base Ternary Systems. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion* [online]. 2004, 2004, **25**(4), 320-328 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11669-004-0150-5.pdf>
- [31] FRANKE, P. a D. NEUSCHÜTZ. Cu-Si. *SpringerLink* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/10757413_16
- [32] Solubility of Gas in Copper. *Continuus Properzi* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.properzi.com/literature/category/4-copper-rod-and-wire>
- [33] Fázový diagram systému C-Cu. *Himikatus.ru* [online]. c2018 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://www.himikatus.ru/art/phase-diagr1/C-Cu.php>
- [34] NOVÁ, Iva a Jiří MACHUTA. *Fyzikální metalurgie*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-084-2.
- [35] *SIGMA TEST Přenosný vířivoproudý přístroj pro měření elektrické vodivosti všech neželezných kovů*. [online]. Praha [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/17332564-Sigmatest-2-069-prenosny-virivoproudny-pristroj-pro-mereni-elektricke-vodivosti-vsech-nezelezných-kovu.html>
- [36] *Měření elektrické vodivosti kolagenu*. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Jaromír Štancl, Ph.D.
- [37] SAMEK, Josef. *Měření odporu měděných vzorků*. Brno: VUT Brno, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

| | | |
|---------------|-------------------|------------------------------|
| B_p | - | úměra přispění vakancí |
| B_q | - | úměra přispění dislokací |
| E | J | energie elektronu |
| E_F | J | Fermiho energie |
| L | $W.\Omega.K^{-2}$ | Lorencovo číslo |
| L | m | délka |
| R | Ω | odpor |
| S | m^2 | průřez |
| T | K | teplota |
| T | $^{\circ}C$ | teplota |
| T_F | K | Fermiho teplota |
| X | - | plocha eutektika na výbr |
| Y | - | množství kyslíku |
| b_s | m | vzdálenost mezi jednotliv |
| f | Hz | kmitočet záření |
| f | - | součinitel |
| h | J.s | Planckova konstanta |
| k | $J.K^{-1}$ | Boltzmannova konstanta |
| m | kg | hmotnost |
| n_d | m^{-1} | hustota dislokací |
| v | $m.s^{-1}$ | rychlost |
| v_a | m^3 | atomový objem |
| v_e | $m.s^{-1}$ | rychlost elektronu |
| α_{el} | K^{-1} | teplotní součinitel elektric |
| β | $\Omega.m$ | povrch vrstevné chyby |
| γ | $S.m^{-1}$ | měrná elektrická vodivos |
| ε | - | míra deformace |
| λ | m | vlnová délka |
| λ_t | $W.m^{-1}.K^{-1}$ | měrná tepelná vodivost |
| ρ | $\Omega.m$ | rezistivita |
| ρ_0 | $\Omega.m$ | rezistivita při $T=0K$ |
| ρ_d | Ω | přírůstek odporu od jedn |
| ρ_v | $\Omega.m$ | přírůstek odporu od jedn |

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – metalografické výbrusy odlitých vzorků

Příloha 2 – protokol *Měření odporu měděných vzorků*